

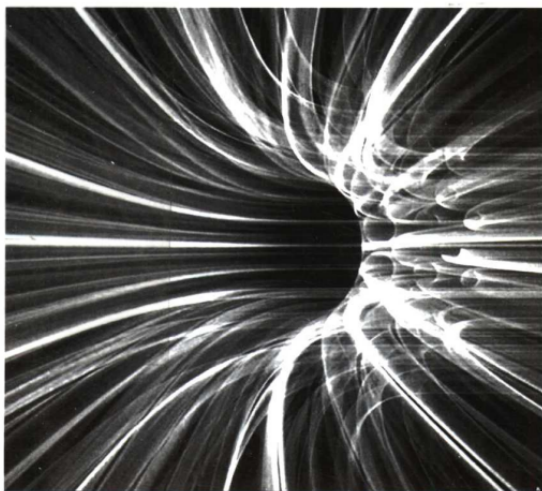


经典教材辅导用书  
电工系列

# 新编电机学 题解

机工社《电机学》(第二版)(汤蕴璆主编)  
重点与难点、习题详解、经典题型、补充习题及解答

主 编 孙克军  
副主编 朱维璐  
王素芝



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

策划编辑: 李 德

责任编辑: 谢佩玲

## ● 电工系列丛书

- 新编工程电磁场题解

《工程电磁场导论》(冯慈璋 马西奎 主编)

- 新编电路分析基础题解

《电路分析基础》(李翰荪 主编)

- 数字电路与逻辑设计题解

《数字电路与逻辑设计》(第三版)(王毓银 主编)

- 模拟电子技术基础题解

高教版《模拟电子技术基础》(第三版)(童诗白 华英成主编)

- 电力系统分析题解

华科大社《电力系统分析》(上、下)(第三版)(何仰赞 温增银)

- 新编电机学题解

机工社《电机学》(第二版)(汤蕴璆主编)

ISBN 978-7-5609-4069-4



9 787560 940694 >

定价: 16.00元

2007

TM3/41=2A

2007

# 新编电机学题解

主 编 孙克军  
副主编 朱维璐 王素芝  
参 编 梁国壮 魏英静

华中科技大学出版社  
中国·武汉

**图书在版编目(CIP)数据**

新编电机学题解/孙克军 主编. —武汉:华中科技大学出版社,  
2007年9月

ISBN 978-7-5609-4069-4

I. 新… II. 孙… III. 电机学-高等学校-解题  
IV. TM3-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第083914号

**新编电机学题解**

孙克军 主编

策划编辑:李 德

责任编辑:谢佩玲

责任校对:刘 竣

封面设计:潘 群

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心设计室

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:880mm×1230mm 1/16

印张:11.5

字数:305 000

版次:2007年9月第1版

印次:2007年9月第1次印刷

定价:16.00元

ISBN 978-7-5609-4069-4/TM·87

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



## 内 容 提 要

本书是为“电机学”课程编写的学习指导书。收编了汤蕴璆、史乃编著的普通高等教育“十五”国家级规划教材《电机学》第2版中的全部习题,并收编了其他版本《电机学》中一些有代表性的习题,而且还收编了一些高等院校硕士研究生入学试题中的部分试题。书中归纳和阐明了各章教学重点和难点,以及易错易混淆的问题,同时对收编的全部习题和试题都给出了较详细地解答。

本书内容丰富,可供高等院校有关专业学生在复习和考研时使用,也可供教学人员和自学者参考。

# 前 言

本书是为“电机学”课程编写的学习指导书。为了便于教学和读者阅读,各章的编写次序和所用名词、符号均与汤蕴璆、史乃编著的机械工业出版社出版的普通高等教育“十五”国家级规划教材《电机学》第2版保持一致。

全书共7章,内容包括磁路、变压器、直流电机、交流绕组及其电动势和磁动势、感应电机、同步电机、机电能量转换原理等。各章又分别包括重点和难点、习题详解、经典题型、补充习题及解答等四大部分。在重点和难点中,归纳和阐明了教学主要内容及易错易混淆的问题;在习题详解中,对汤蕴璆、史乃编著的《电机学》第2版中的全部习题进行了详细解答;在经典题型中,收编了一些高等院校硕士研究生入学试题中的部分试题,并给出了较详细的解答;在补充习题中,收编了其他版本《电机学》中具有一定代表性的习题,并进行了解答,供读者在自学、复习和考研时参考。

本书内容丰富,有助于学习和掌握“电机学”课程的基本原理和基本工程计算方法,并有助于拓宽思路、加深理解。可供高等院校有关专业学生在复习和考研时使用,也可供教学人员、自学人员以及有关工程技术人员使用。

本书由孙克军主编,朱维璐和王素芝任副主编。第1章由王素芝编写,第2章由孙克军和魏英静编写,第3章由朱维璐编写,第4、5章由孙克军编写,第6章由王素芝和梁国壮编写,第7章由梁国壮编写。编者对关心本书出版、热心提出建议和提供资料的单位和个人在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有缺点和错误之处,恳请广大读者批评指正。

编 者  
2007年4月

# 目 录

<b>第 1 章 磁路</b>	(1)
1.1 重点和难点	(1)
1.2 习题详解	(4)
1.3 经典题型	(13)
1.4 补充习题及解答	(16)
<b>第 2 章 变压器</b>	(19)
2.1 重点和难点	(19)
2.2 习题详解	(31)
2.3 经典题型	(63)
2.4 补充习题及解答	(70)
<b>第 3 章 直流电机</b>	(81)
3.1 重点和难点	(81)
3.2 习题详解	(87)
3.3 经典题型	(98)
3.4 补充习题及解答	(106)
<b>第 4 章 交流绕组及其电动势和磁动势</b>	(120)
4.1 重点和难点	(120)
4.2 习题详解	(132)
4.3 经典题型	(167)
4.4 补充习题及解答	(174)
<b>第 5 章 感应电机</b>	(188)
5.1 重点和难点	(188)
5.2 习题详解	(205)
5.3 经典题型	(244)
5.4 补充习题及解答	(257)
<b>第 6 章 同步电机</b>	(272)
6.1 重点和难点	(272)

---

6.2	习题详解 .....	(286)
6.3	经典题型 .....	(321)
6.4	补充习题及解答 .....	(330)
第7章	机电能量转换原理 .....	(341)
7.1	重点和难点 .....	(341)
7.2	习题详解 .....	(341)
7.3	经典题型 .....	(350)
7.4	补充习题及解答 .....	(352)
参考文献	.....	(358)

# 第 1 章 磁 路

## 1.1 重点和难点

### 1.1.1 重点

#### 1. 磁路的基本定律

##### 1) 安培环路定律

沿着任意一条闭合回线  $L$ , 磁场强度  $H$  的线积分值等于闭合回线所包围的总电流(代数和), 即

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum i$$

式中: 若电流的正方向与闭合回线的环绕方向符合右手螺旋关系,  $i$  取正号, 否则取负号。

沿着回线  $L$ , 磁场强度  $H$  大小不变且方向总是与  $L$  相同, 回线  $L$  包围的全电流是  $N$  匝线匝的总电流时, 安培环路定律可简化为

$$HL = Ni$$

##### 2) 磁路欧姆定律

作用在磁路上的磁动势  $F$  等于磁路内的磁通  $\Phi$  乘以磁阻  $R_m$ , 即

$$F = \Phi R_m$$

或

$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$

式中:  $F = Ni$  为作用在磁路上的磁动势(A);  $\Phi$  为磁路内的磁通(Wb);  $R_m$  为磁路的磁阻(A/Wb)。

磁路的磁阻  $R_m$  与磁路的平均长度  $l(\text{m})$  成正比, 与磁路的截面积  $A(\text{m}^2)$  及构成磁路的材料的磁导率  $\mu(\text{H/m})$  成反比, 即

$$R_m = \frac{l}{\mu A}$$

## 3) 磁路的基尔霍夫第一定律

由于磁力线是无头无尾的闭合曲线,所以穿出或进入任一闭合磁力线的总磁通恒等于零,即  $\sum \Phi = 0$ 。

## 4) 磁路的基尔霍夫第二定律

作用在任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路的磁压降代数和,即

$$F = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n \Phi_k R_{mk}$$

式中:  $H_k$  和  $l_k$  分别是第  $k$  段磁路的平均磁场强度和平均磁路长度,两者乘积  $H_k l_k$  为第  $k$  段磁路的磁压降。

由于  $H_k l_k = \Phi_k R_{mk}$

所以,  $\Phi_k R_{mk}$  也是第  $k$  段磁路的磁压降。

## 2. 铁磁材料的特性

铁磁材料具有以下特性。

## 1) 高导磁性

铁磁材料的磁导率  $\mu_{Fe}$  远大于真空磁导率  $\mu_0$ ,  $\mu_{Fe}$  在  $2000\mu_0 \sim 6000\mu_0$  之间。

## 2) 饱和特性

磁场较强时,随着磁场强度  $H$  的增加,铁磁材料的磁通密度(简称磁密)  $B$  将增加得越来越慢,这种现象称为饱和。饱和时铁磁材料的磁导率  $\mu_{Fe}$  不是常数,它随着磁通密度  $B$  的增大而减小。

## 3) 磁滞特性

磁通密度  $B$  的变化滞后于磁场强度  $H$  的变化,这种现象称为磁滞。铁磁材料一旦被磁化,去掉外磁场后,会有剩磁,即  $H = 0$  时,  $B = B_r$ 。  $B_r$  称为剩余磁通密度,简称剩磁。

## 3. 铁磁材料的铁心损耗

当铁磁材料内的磁场交变时,会产生磁滞损耗和涡流损耗,两者之和称为铁心损耗。

1) 磁滞损耗  $p_h$ 

$$p_h = C_h f B_m^n V$$

式中:  $C_h$  为磁滞损耗系数, 与材料性质有关;  $B_m$  为铁心磁通密度的最大值; 对于一般硅钢片,  $n$  取  $1.6 \sim 2.3$ 。

### 2) 涡流损耗 $p_e$

$$p_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V$$

式中:  $C_e$  为损耗系数, 其大小取决于材料的电阻率;  $\Delta$  为钢片厚度。

### 3) 铁心损耗 $p_{Fe}$

$$p_{Fe} = p_h + p_e \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 m$$

式中:  $C_{Fe}$  为铁心的损耗系数;  $m$  为铁心质量。

## 1.1.2 难点

### 1. 对铁磁材料饱和特性的理解

对铁磁材料饱和特性的理解是本章的难点之一。

### 2. 磁路的计算

磁路的计算有正问题和逆问题两种。正问题是给定磁通, 然后计算所需的励磁磁动势; 逆问题是给定磁动势, 求取磁通。

#### 1) 磁路正问题的计算步骤

(1) 根据已知条件, 计算磁路长度  $l_k$  和截面积  $A_k$ 。

(2) 由已知的磁通  $\Phi_k$  求磁通密度  $B_k$ ,  $B_k = \frac{\Phi_k}{A_k}$ 。

(3) 由磁通密度  $B_k$  计算磁场强度  $H_k$ 。若第  $k$  段磁路由非磁性材料构成, 则  $H_k = \frac{B_k}{\mu_0}$ 。若由铁磁材料构成, 则由  $B_k$  查材料的磁化曲线, 求得  $H_k$ 。

(4) 计算各段磁路的磁压降  $F_k = H_k l_k$ 。

(5) 计算磁动势  $F$  及励磁电流  $I$ 。

$$F = \sum_{k=1}^n H_k l_k$$

$$I = \frac{F}{N}$$

式中:  $N$  为线圈匝数。

#### 2) 磁路逆问题的计算步骤

(1) 假设磁路的磁通为  $\Phi'$ 。

(2) 按照正问题中的求解步骤, 求出产生磁通  $\Phi'$  所需的磁动势  $F'$  或励磁电流  $I'$ 。

(3) 将计算出的磁动势  $F'$  与已知的磁动势  $F$  进行比较, 若两者相等, 则假设的磁通  $\Phi'$  即为所求, 否则重新假设磁通  $\Phi''$ , 再求对应的磁动势  $F''$ , 直到  $F''$  与  $F$  相等为止。

## 1.2 习题详解

### 1-1 磁路的磁阻如何计算? 磁阻的单位是什么?

答 磁路的磁阻  $R_m$  主要取决于磁路的几何尺寸和构成磁路所用材料的磁导率  $\mu$ , 其大小与磁路的平均长度  $l$  成正比, 与磁路的截面积  $A$  及磁路材料的磁导率  $\mu$  成反比, 即

$$R_m = \frac{l}{\mu A}$$

式中: 当长度  $l$  的单位为 m, 截面积  $A$  的单位为  $\text{m}^2$ , 磁导率  $\mu$  的单位为  $\text{H/m}$  时, 磁阻  $R_m$  的单位为  $\text{A/Wb}$  或  $\text{H}^{-1}$ 。

1-2 磁路的基本定律有哪几条? 当铁心磁路上有几个磁动势同时作用时, 磁路计算能否用叠加原理, 为什么?

答 磁路的基本定律有四条:

- (1) 安培环路定律;
- (2) 磁路欧姆定律;
- (3) 磁路的基尔霍夫第一定律;
- (4) 磁路的基尔霍夫第二定律。

其中, 磁路欧姆定律是以安培环路定律为基础推导得出的, 而磁路的基尔霍夫第二定律是安培环路定律的另一种形式。

当铁心磁路上有几个磁动势同时作用时, 磁路计算往往不能应用叠加原理。叠加原理仅适用于线性电路或线性磁路, 而铁心的磁路往往是非线性的, 这是因为铁磁材料的磁导率  $\mu$  不是常数, 而是磁通密度  $B$  的函数。当  $B$  很小时, 磁场较弱, 铁心处于非饱和状态, 铁心磁导率  $\mu$  近似为常数, 这时的铁心可以看做是线性的; 当  $B$  较大, 磁场较强, 铁心处于饱和状态时, 铁心磁导率  $\mu$  不是常数, 将随磁通密度  $B$  的变化而变化,



这时的铁心磁导率是非线性的,所以,磁路计算时往往不能应用叠加原理。

**1-3 基本磁化曲线与起始磁化曲线有何区别,磁路计算时用的是哪一种磁化曲线?**

**答** 磁化曲线是磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  的关系曲线。将一块未被磁化过的铁磁材料进行磁化,当磁场强度  $H$  由零逐渐增大时,磁感应强度  $B$  也随之增大。在测得对应于不同  $H$  值下的磁感应强度  $B$  后,便可逐点绘制出  $B = f(H)$  曲线,这条曲线称为铁磁材料的起始磁化曲线。

对同一铁磁材料,选择不同的磁场强度  $H_m$ ,将铁磁材料在  $-H_m$  到  $+H_m$  之间进行反复磁化,可得到一系列大小不同的磁滞回线,将各磁滞回线的顶点联结起来,所得的曲线称为基本磁化曲线。

起始磁化曲线与基本磁化曲线的区别在于前者是铁磁材料第一次磁化后得到的,后者是铁磁材料被反复磁化后得到的,但差别不大。磁路计算时所用的磁化曲线是基本磁化曲线,因为这条曲线更能反映磁路工作时的实际情况。

**1-4 铁心中的磁滞损耗和涡流损耗是怎样产生的?它们各与哪些因素有关?**

**答** 磁滞损耗是由铁磁材料的磁滞现象所引起的。铁磁材料内部有很多小磁畴,当铁心中磁场变化时,铁心中的小磁畴受外磁场影响来回翻转,在翻转过程中磁畴之间不停地相互摩擦,消耗能量,产生损耗,这种损耗称为磁滞损耗。

对于一定规格的铁磁材料,磁滞损耗  $p_h$  与磁场交变的频率  $f$ 、铁心的体积  $V$ 、磁感应强度最大值  $B_m$  的  $n$  次方成正比,即

$$p_h = C_h f B_m^n V$$

式中:  $C_h$  为磁滞损耗系数,其大小取决于材料性质;对于一般电工钢片,  $n$  取  $1.6 \sim 2.3$ 。

当铁心中穿过的磁通随时间变化时,根据电磁感应定律,铁心中将产生感应电动势,由于铁心是电导体,所以将引起环流。这些环流在铁心内部围绕磁通呈漩涡状流动,故称为涡流。涡流在铁心中引起的损耗,称为涡流损耗,用  $p_e$  表示。

对于一定规格的铁磁材料,涡流损耗  $p_e$  与铁心中磁场交变频率  $f$  的平方、磁感应强度最大值  $B_m$  的平方、铁心的体积  $V$  及钢片厚度  $\Delta$  的平方成正比,即

$$p_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V$$

式中:  $C_e$  为涡流损耗系数,其大小取决于材料的电阻率。

### 1-5 说明交流磁路和直流磁路的不同点。

答 交流磁路和直流磁路的不同点如下。

(1) 在直流磁路中,励磁电流是直流电流,因此,磁路中的磁动势及其所激励的磁通均是恒定的,不随时间变化;而在交流磁路中,励磁电流是交流电流,因此,磁路中的磁动势及其所激励的磁通均随时间而交变,但在每一瞬间仍和直流磁路一样,遵循磁路的基本定律。

(2) 在进行磁路计算时,直流磁路的磁通、磁通密度、磁动势和磁场强度均是实际值,而交流磁路表明磁路的工作点与饱和情况,磁通和磁通密度均用交流的幅值表示,磁动势则用有效值表示。

(3) 直流磁路的磁通恒定不变,所以磁路中没有铁耗;而交流磁路中的磁通随时间交变,所以磁路中有铁耗。

(4) 直流磁路中的磁通是恒定的,不随时间变化,所以不会在励磁线圈中产生感应电动势;而交流磁路中的磁通随时间交变,会在励磁线圈中产生感应电动势。

(5) 由于铁磁材料的磁感应强度与磁场强度之间是非线性关系,因而磁路中的磁通与励磁电流之间也是非线性关系。在交流磁路中,当磁通是正弦波时,励磁电流为尖顶波;反之,当励磁电流为正弦波时,磁通便为平顶波。

1-6 图 1-1 所示为一铁心线圈,已知线圈的匝数  $N = 1000$ ,铁心厚度为  $0.025 \text{ m}$ ,铁心由厚度为  $0.35 \text{ mm}$  的 DR320 硅钢片叠成,叠片系数(即截面中铁的面积与总面积之比)  $K_{Fe} = 0.93$ ,不计漏磁。试计算:

(1) 中间心柱的磁通为  $7.5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ,不计铁心的磁位降时,所需的直流励磁电流;

(2) 考虑铁心磁位降时,产生同样的磁通所需的励磁电流。

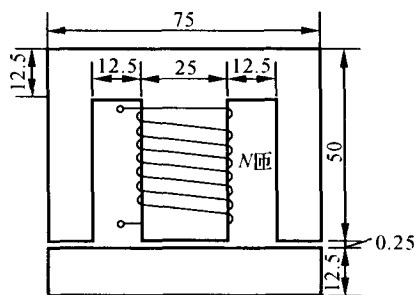


图 1-1 习题 1-6 的铁心线圈(尺寸均为 mm)

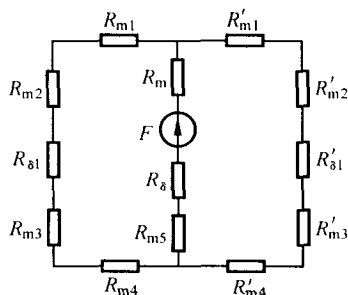


图 1-2 习题 1-6 的模拟电路

**解** 为了便于理解,先画出与此磁路相应的模拟电路,如图 1-2 所示。由于左、右两条并联磁路所用的材料及磁路的尺寸均相同,所以,两条并联磁路是对称的,故只需计算其中一个磁回路即可。

根据磁路的基尔霍夫第一定律可得

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = 2\Phi_1 = 2\Phi_2$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{1}{2}\Phi = \frac{1}{2} \times 7.5 \times 10^{-4} \text{ Wb} = 3.75 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

以左边的磁回路为研究对象,首先将磁路分段。

中间的气隙段:长为  $\delta$ , 截面积为  $A_\delta$ ;

中间心柱上铁心段:长为  $l$ , 截面积为  $A$ ;

上铁轭段:长为  $l_1$ , 截面积为  $A_1$ ;

左边铁轭上铁心段:长为  $l_2$ , 截面积为  $A_2$ ;

左边的气隙段:长为  $\delta_1$ , 截面积为  $A_{\delta 1}$ ;

左边铁轭下铁心段:长为  $l_3$ , 截面积为  $A_3$ ;

下铁轭段:长为  $l_4$ , 截面积为  $A_4$ ;

中间心柱下铁心段:长为  $l_5$ , 截面积为  $A_5$ 。

各段磁路长分别为

$$l = \left( 50 - \frac{1}{2} \times 12.5 \right) \text{ mm} = 43.75 \text{ mm} = 0.04375 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} l_1 &= \left[ \frac{1}{2} \times 25 + 12.5 + \frac{1}{4} \times (75 - 12.5 \times 2 - 25) \right] \text{ mm} \\ &= 31.25 \text{ mm} = 0.03125 \text{ m} \end{aligned}$$

$$l_2 = l = 0.04375 \text{ m}$$

$$l_3 = l_5 = \frac{1}{2} \times 12.5 \text{ mm} = 6.25 \text{ mm} = 0.00625 \text{ m}$$

$$l_4 = l_1 = 0.03125 \text{ m}$$

$$\delta = \delta_1 = 0.25 \text{ mm} = 0.00025 \text{ m}$$

各段磁路的导磁截面积分别为

$$A = K_{\text{Fe}}(0.025 \times 25 \times 10^{-3}) = 0.93 \times 0.025^2 \text{ m}^2 = 5.8125 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_1 = K_{\text{Fe}}(0.025 \times 12.5 \times 10^{-3}) = 0.93 \times 0.025 \times 0.0125 \text{ m}^2 \\ = 2.90625 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_2 = A_3 = K_{\text{Fe}} \times 0.025 \times \frac{1}{2} \times (75 - 12.5 \times 2 - 25) \times 10^{-3} \\ = 0.93 \times 3.125 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2.90625 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_4 = A_1 = 2.90625 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_5 = A = 5.8125 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_\delta = (0.025 + 0.25 \times 10^{-3}) \times (25 + 0.25) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\ = 6.3756 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{\delta 1} = (0.025 + 0.25 \times 10^{-3}) \times (12.5 + 0.25) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\ = 3.219375 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

计算气隙有效截面积时,要考虑磁场的边缘效应,因此在长、宽方向各增加一个气隙长。

各段磁路的磁通密度分别为

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{5.8125 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.29 \text{ T}$$

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{A_1} = \frac{3.75 \times 10^{-4}}{2.90625 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.29 \text{ T}$$

$$B_2 = B_3 = B_4 = B_1 = 1.29 \text{ T}$$

$$B_5 = B = 1.29 \text{ T}$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{A_\delta} = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{6.375625 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.17636 \text{ T}$$

$$B_{\delta 1} = \frac{\Phi_1}{A_{\delta 1}} = \frac{3.75 \times 10^{-4}}{3.219375 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.16482 \text{ T}$$

各段磁路的磁场强度分别计算如下。

根据  $B = 1.29 \text{ T}$ , 查 DR320 硅钢片的磁化曲线得,  $H = 7.2 \times 10^2 \text{ A/m}$ 。

因为  $B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = B_5 = B$

所以  $H = H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = H_5 = 7.2 \times 10^2 \text{ A/m}$

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{1.17636}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 9.3612 \times 10^5 \text{ A/m}$$

$$H_{\delta 1} = \frac{B_{\delta 1}}{\mu_0} = \frac{1.16482}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 9.2693 \times 10^5 \text{ A/m}$$

(1) 不计铁心磁压降时所需的直流励磁电流。根据磁路的基尔霍夫第二定律, 有

$$\begin{aligned} NI_f &= H_\delta \delta + H_{\delta 1} \delta_1 \\ &= (9.3612 \times 10^5 \times 0.25 \times 10^{-3} + 9.2693 \times 0.25 \times 10^{-3}) \text{ A} \\ &= 465.7625 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_f = \frac{NI_f}{N} = \frac{465.7625}{1000} \text{ A} = 0.466 \text{ A}$$

(2) 考虑铁心磁压降时, 产生同样的磁通所需的励磁电流。根据磁路的基尔霍夫第二定律, 有

$$\begin{aligned} NI_f &= H_\delta \delta + H_{\delta 1} \delta_1 + H(l + l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) \\ &= [465.7625 + 7.2 \times 10^2 \times (43.75 + 31.25 + 43.75 + 6.25 \\ &\quad + 31.25 + 6.25) \times 10^{-3}] \text{ A} = 582.7625 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_f = \frac{NI_f}{N} = \frac{582.7625}{1000} \text{ A} = 0.583 \text{ A}$$

1-7 图 1-3 所示是一铁心线圈, 线圈 A 为 100 匝, 通入电流 1.5 A, 线圈 B 为 50 匝, 通入电流 1 A, 铁心截面均匀, 求 PQ 两点间的磁压降。

解 与此磁路相应的模拟电路图如图 1-4 所示。

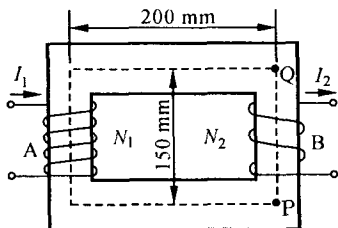


图 1-3 习题 1-7 的铁心线圈

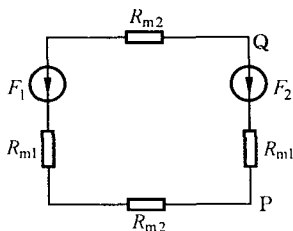


图 1-4 习题 1-7 的模拟电路图

由于铁心截面积均匀,各截面所通过的磁通均相同,所以各段磁路的磁通密度和磁场强度均相同。根据安培环路定律,有

$$Hl = \sum I = N_1 I_1 - N_2 I_2 = (100 \times 1.5 - 50 \times 1) \text{ A} = 100 \text{ A}$$

因为  $l = (200 \times 2 + 150 \times 2) \times 10^{-3} \text{ m} = 0.7 \text{ m}$

所以 
$$H = \frac{\sum I}{l} = \frac{100}{0.7} \text{ A/m} = 142.857 \text{ A/m}$$

PQ 两点间的磁压降

$$F_{PQ} = Hl_{PQ} + N_2 I_2 = (142.857 \times 0.15 + 50) \text{ A} = 71.43 \text{ A}$$

需要说明的是,磁动势与磁压降的方向相反,这与电路中电势与电压方向相反的意思是一样的。

1-8 图 1-5 所示的铸钢铁心,其各部分尺寸如下表所示。

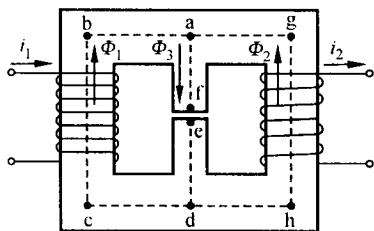


图 1-5 习题 1-8 的铁心

路径	截面积 / $\times 10^{-4} \text{ m}^2$	长度 / $\times 10^{-2} \text{ m}$
abcd	4	50
aghd	5	75
af	2.5	10
fe	2.75	0.25
ed	2.5	10

左边线圈通入电流,产生的磁动势为 1500 A。试求下列三种情况下右边线圈应加的磁动势值:

- (1) 气隙磁通为  $1.65 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ;
- (2) 气隙磁通为零;
- (3) 右边心柱中的磁通为零。

解 (1) 气隙磁通为  $1.65 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 。根据磁路的基尔霍夫第二定律,有

$$H_1 l_{abcd} + H(l_{af} + l_{ed}) + H_\delta l_{fe} = F_1$$

式中:  $F_1$  是左边线圈的磁动势,  $F_1 = 1500 \text{ A}$ ;  $H_\delta$  是气隙的磁场强度,

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}; \text{气隙磁通密度 } B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{A_\delta}.$$

$$\begin{aligned} \text{因此 } H_{\delta} &= \frac{\Phi_{\delta}}{\mu_0 A_{\delta}} = \frac{1.65 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7} \times 2.75 \times 10^{-4}} \text{ A/m} \\ &= 4.77465 \times 10^5 \text{ A/m} \end{aligned}$$

$H$  是中间铁心柱的磁场强度,其对应的磁通密度为

$$B = \frac{\Phi_{\delta}}{A} = \frac{1.65 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.66 \text{ T}$$

根据  $B = 0.66 \text{ T}$  查铸钢的磁化曲线,得  $H = 4.9 \times 10^2 \text{ A/m}$ 。则左边铁心柱的磁场强度  $H_1$  为

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{F_1 - H_{\delta} l_{fe} - H(l_{af} + l_{cd})}{l_{abcd}} \\ &= \frac{1500 - 477465 \times 0.25 \times 10^{-2} - 490 \times (10 + 10) \times 10^{-2}}{50 \times 10^{-2}} \text{ A/m} \\ &= 416.675 \text{ A/m} \end{aligned}$$

根据  $H_1 = 416.675 \text{ A/m}$  查铸钢的磁化曲线,得  $B_1 = 0.57 \text{ T}$ , 则

$$\Phi_1 = B_1 A_1 = 0.57 \times 4 \times 10^{-4} \text{ Wb} = 2.28 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

根据磁路的基尔霍夫第一定律,有

$$\begin{aligned} \Phi_1 + \Phi_2 &= \Phi_{\delta} \\ \Phi_2 &= \Phi_{\delta} - \Phi_1 = (1.65 \times 10^{-4} - 2.28 \times 10^{-4}) \text{ Wb} \\ &= -0.63 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

负号表明  $\Phi_2$  的实际方向与图 1-5 中的参考方向相反。右边铁心柱的磁通密度

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A_2} = \frac{-0.63 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-4}} \text{ T} = -0.126 \text{ T}$$

根据  $|B_2| = 0.126 \text{ T}$  查铸钢的磁化曲线,得  $|H_2| = 77 \text{ A/m}$ , 对右边磁回路应用磁路的基尔霍夫第二定律,得

$$\begin{aligned} F_2 &= H_2 l_{aghd} + H_{\delta} l_{fe} + H(l_{af} + l_{cd}) \\ &= [-77 \times 75 \times 10^{-2} + 477465 \times 0.25 \times 10^{-2} \\ &\quad + 490 \times (10 + 10) \times 10^{-2}] \text{ A} \\ &= 1234 \text{ A} \end{aligned}$$

(2) 气隙磁通为零时。对左边磁回路应用基尔霍夫第二定律,有

$$F_1 = H_1 l_{abcd} + H(l_{af} + l_{cd}) + H_{\delta} l_{fe}$$

因为

$$\Phi_{\delta} = 0$$

所以

$$B = 0, \quad B_{\delta} = 0$$

$$H = 0, \quad H_{\delta} = 0$$

$$F_1 = H_1 l_{abcd}$$

$$H_1 = \frac{F_1}{l_{abcd}} = \frac{1500}{50 \times 10^{-2}} \text{ A/m} = 3000 \text{ A/m}$$

根据  $H_1 = 3000 \text{ A/m}$  查铸钢的磁化曲线, 得  $B_1 = 1.5 \text{ T}$ , 故

$$\Phi_1 = B_1 A_1 = 1.5 \times 4 \times 10^{-4} \text{ Wb} = 6.0 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

因为

$$\Phi_{\delta} = 0$$

所以

$$\Phi_2 = -\Phi_1 = -6.0 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A_2} = \frac{-6.0 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-4}} \text{ T} = -1.2 \text{ T}$$

根据  $|B_2| = 1.2 \text{ T}$  查铸钢的磁化曲线, 得  $|H_2| = 12.7 \times 10^2 \text{ A/m}$ , 对右边的磁回路应用基尔霍夫第二定律, 有

$$F_2 = H_2 l_{aghd} = -12.7 \times 10^2 \times 75 \times 10^{-2} \text{ A} = -952.5 \text{ A}$$

(3) 右边心柱中的磁通为零时, 对左边磁回路应用基尔霍夫第二定律, 有

$$F_1 = H_1 l_{abcd} + H(l_{af} + l_{cd}) + H_{\delta} l_{\delta c}$$

式中:  $H_1$  需由  $B_1$  查磁化曲线求得,  $B_1 \propto \Phi_1$ ;  $H$  需由  $B$  查磁化曲线求得,

$$B \propto \Phi_{\delta}; H_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\mu_0 A_{\delta}} \propto \Phi_{\delta}.$$

因为

$$\Phi_2 = 0$$

所以

$$\Phi_{\delta} = \Phi_1$$

由于  $H_1$  与  $B_1$  之间是非线性关系, 因而不能直接解方程求  $\Phi_1$ 。采用试探法, 即先假设  $\Phi_1$  的值, 然后由  $\Phi_1$  的假设值  $\Phi'_1$  求  $B'_1$  及  $B'$ , 查磁化曲线求取  $H'_1$  和  $H'$  代入  $F_1$  的计算式求得  $F'_1$ 。若  $F'_1$  与  $F_1$  相等, 则  $\Phi'_1$  是  $\Phi_1$  的实际值, 否则重新假设, 直至  $F'_1$  与  $F_1$  相等为止。

设

$$\Phi'_1 = 1.718 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

则

$$B'_1 = \frac{\Phi'_1}{A_1} = \frac{1.718 \times 10^{-4}}{4.0 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.4295 \text{ T}$$



$$B' = \frac{\Phi'_1}{A} = \frac{1.718 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.6872 \text{ T}$$

根据  $B'_1$ 、 $B'$  查铸钢磁化曲线, 分别得

$$H'_1 = 300 \text{ A/m}, H' = 536 \text{ A/m}$$

$$H'_\delta = \frac{\Phi'_1}{\mu_0 A_\delta} = \frac{1.718 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7} \times 2.75 \times 10^{-4}} \text{ A/m} = 49.7142 \times 10^4 \text{ A/m}$$

$$\begin{aligned} F'_1 &= H'_1 l_{abcd} + H'(l_{af} + l_{cd}) + H'_\delta l_{fe} \\ &= [300 \times 50 \times 10^{-2} + 536 \times (10 + 10) \times 10^{-2} \\ &\quad + 49.7142 \times 10^4 \times 0.25 \times 10^{-2}] \text{ A} \\ &= 1500.055 \text{ A} \end{aligned}$$

因为  $F'_1 \approx F_1 = 1500 \text{ A}$

所以  $\Phi'_1 = \Phi_1$ ,  $\Phi_1 = 1.718 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

对于由左、右心柱构成的磁回路, 应用基尔霍夫第二定律, 得

$$F_1 - F_2 = H_1 l_{abcd} = 300 \times 50 \times 10^{-2} \text{ A} = 150 \text{ A}$$

$$F_2 = F_1 - 150 = (1500 - 150) \text{ A} = 1350 \text{ A}$$

### 1.3 经典题型

1. 图 1-6 所示为一铁心线圈, 其匝数为 400, 线圈电阻为  $10 \Omega$ 。设铁心厚度为  $50 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 铁心磁导率为无穷大, 若不计气隙磁场的边缘效应, 试求:

(1) 该铁心磁路的磁阻并画出模拟电路;

(2) 每个气隙中的磁通与线圈电流的函数关系。

解 (1) 由于铁心磁导率  $\mu_{Fe} = \infty$ , 因而铁心部分的磁阻  $R_{mFe}$  为零。

$$\text{左边的气隙磁阻 } R_{m\delta 1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 A_{\delta 1}};$$

$$\text{右边的气隙磁阻 } R_{m\delta 2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 A_{\delta 2}}.$$

若不计气隙磁场的边缘效应, 则

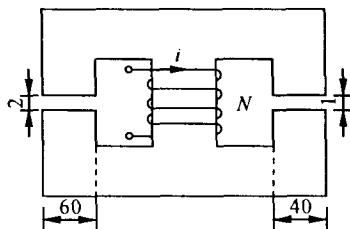


图 1-6 经典题型 1 的铁心线圈  
(图中尺寸单位为 mm)

$$A_{\delta 1} = 50 \times 10^{-3} \times 600 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 0.03 \text{ m}^2$$

$$A_{\delta 2} = 50 \times 10^{-3} \times 400 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 0.02 \text{ m}^2$$

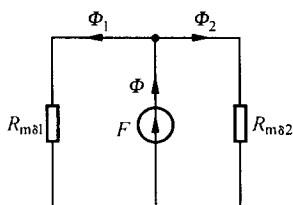


图-7 经典题型 1 的模拟电路图

$$R_{m\delta 1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 A_{\delta 1}} = \frac{20 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 0.03} \text{ A/Wb}$$

$$= 5.30516 \times 10^5 \text{ A/Wb}$$

$$R_{m\delta 2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 A_{\delta 2}} = \frac{10 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 0.02} \text{ A/Wb}$$

$$= 3.97887 \times 10^5 \text{ A/Wb}$$

与铁心磁路相应的模拟电路如图

1-7 所示。

(2) 铁心磁路的总磁阻

$$R_m = \frac{R_{m\delta 1} R_{m\delta 2}}{R_{m\delta 1} + R_{m\delta 2}} = \frac{5.30516 \times 10^5 \times 3.97887 \times 10^5}{5.30516 \times 10^5 + 3.97887 \times 10^5} \text{ A/Wb}$$

$$= 2.27364 \times 10^5 \text{ A/Wb}$$

应用磁路欧姆定律,得

$$F = \Phi_1 R_{m\delta 1} = \Phi_2 R_{m\delta 2}$$

磁动势

$$F = Ni = 400i$$

磁通分别为

$$\Phi_1 = \frac{F}{R_{m\delta 1}} = \frac{400i}{5.30516 \times 10^5} \text{ Wb} = 7.54 \times 10^{-4} i \text{ Wb}$$

$$\Phi_2 = \frac{F}{R_{m\delta 2}} = \frac{400i}{3.97887 \times 10^5} \text{ Wb} = 10.0531 \times 10^{-4} i \text{ Wb}$$

2. 有一环形铁心线圈,其内径为 80 mm,外径为 120 mm,铁环的横截面是矩形,其截面积为  $0.01 \text{ m}^2$ 。铁心采用 DR510 环形硅钢片叠压而成,钢片叠压系数为 0.95。磁路中含有一空气隙,其长度为 1 mm。若线圈匝数为 1000,求当线圈中的电流为 2.333 A 时铁心中的磁通。

解 环的径向宽度  $b = \frac{1}{2} \times (120 - 80) \times 10^{-3} \text{ m} = 0.02 \text{ m}$

环的厚度  $h = \frac{A}{b} = \frac{0.01}{0.02} \text{ m} = 0.5 \text{ m}$

铁心的有效导磁截面积

$$A_{Fe} = K_{Fe} A = 0.95 \times 0.01 \text{ m}^2 = 0.0095 \text{ m}^2$$

考虑气隙磁场的边缘效应,在宽、厚方向上应各增加一个气隙长。

气隙的导磁截面积

$$A_{\delta} = (0.02 + 1 \times 10^{-3}) \times (0.5 + 1 \times 10^{-3}) \text{ m}^2 = 0.010521 \text{ m}^2$$

若铁心中的磁通为  $\Phi$ , 则

铁心的磁通密度

$$B = \frac{\Phi}{A_{Fe}} = \frac{\Phi}{0.0095}$$

气隙的磁通密度

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{A_{\delta}} = \frac{\Phi}{0.010521}$$

气隙的磁场强度

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{\Phi}{4\pi \times 10^{-7} \times 0.010521} = \frac{\Phi}{1.3221 \times 10^{-8}}$$

铁心的平均磁路长度

$$\begin{aligned} l &= [\pi(80 + b) \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}] \text{ m} \\ &= [\pi(80 + 20) \times 10^{-3} - 10^{-3}] \text{ m} \\ &= 0.31316 \text{ m} \end{aligned}$$

根据磁路的基尔霍夫第二定律,得

$$F = Hl + H_{\delta}\delta$$

$$\text{即 } 2.333 \times 1000 \text{ A} = 0.31316 H + \frac{\Phi}{1.3221 \times 10^{-8}} \times 1.0 \times 10^{-3}$$

应用试探法求解磁通  $\Phi$ , 即先假设  $\Phi'$ , 求得  $B'$ , 据  $B'$  查 DR510 硅钢片的磁化曲线, 得  $H'$ , 将  $\Phi'$  和  $H'$  的值代入  $F$  的计算式中求  $F'$ , 若等式成立, 则  $\Phi'$  即为所求, 否则重新假设, 直至满足要求为止。

经多次计算, 得  $\Phi' = 0.0152 \text{ Wb}$  时,  $B' = 1.6 \text{ T}$ , 查 DR510 硅钢片的磁化曲线, 得  $H' = 37.8 \times 10^2 \text{ A/m}$ , 对应的磁动势

$$\begin{aligned} F' &= H'l + \frac{\Phi'}{1.3221 \times 10^{-8}} \times 1.0 \times 10^{-3} \\ &= \left( 37.8 \times 10^2 \times 0.31316 + \frac{0.0152}{1.3221 \times 10^{-8}} \times 1.0 \times 10^{-3} \right) \text{ A} \\ &= 2333 \text{ A} \end{aligned}$$

因为  $F' = F = 1000 \times 2.333 \text{ A} = 2333 \text{ A}$   
 所以  $\Phi = 0.0152 \text{ Wb}$   
 即为所求。

## 1.4 补充习题及解答

### 1.4.1 补充习题

1. 电机的磁路由哪几段组成？

2. 已知磁路的尺寸和材料的磁化曲线，问给定磁通或给定磁动势时，两者计算上有何不同？

3. 电机的电枢铁心为什么要用硅钢片制成？

4. 如图 1-8 所示的并联磁路，铁心所用材料为 DR510 硅钢片，钢片叠压系数为 0.95。三个铁心柱和上、下铁轭的截面积均为  $4 \times 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，磁路段的平均长度为  $l = 10 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，气隙长度为  $\delta = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，励磁线圈的匝数为  $N_1 = N_2 = N_3 = 500$  匝，线圈 1 的电流为  $I_1 = 4 \text{ A}$ ，线圈 2 的电流为  $I_2 = 3.8 \text{ A}$ ，左边铁心柱的磁通为  $\Phi_1 = 9.12 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，求线圈 3 的电流  $I_3$ 。

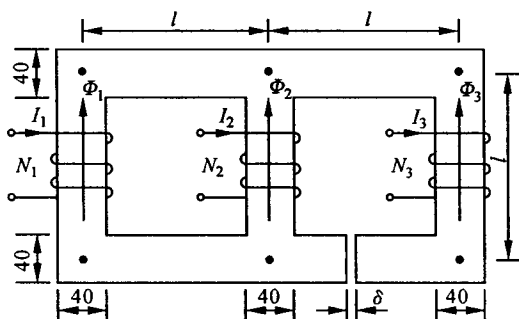


图 1-8 补充习题 4 的并联磁路 (尺寸单位均为 mm)

5. 一铁心线圈，接在  $U = 220 \text{ V}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$  的交流电源上，线圈匝数  $N = 1000$  匝，线圈电阻忽略不计，铁心由 DR510 硅钢片制成，叠压系数  $K_{Fe} = 0.95$ ，铁心截面均匀，截面积  $A = 6.77 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，平均磁路长度  $l = 0.04 \text{ m}$ ，

求铁心中的铁耗  $p_{Fe}$  (DR510 硅钢片的密度  $\rho_{Fe} = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )。

### 1.4.2 补充习题解答

1. 答 直流电机的磁路由五段组成: 主磁极, 定子轭, 转子齿, 转子轭, 气隙。

交流异步电机的磁路亦由五段组成: 定子齿, 定子轭, 转子齿, 转子轭, 气隙。

交流同步电机的磁路由五段组成: 定子齿, 定子轭, 主磁极, 转子轭, 气隙。

2. 答 给定磁通或给定磁动势时, 磁路计算步骤不同。

(1) 若给定磁通  $\Phi$ , 则根据已知的磁路尺寸求得截面积  $A$  和磁路长度  $l$ , 然后求磁通密度  $B = \frac{\Phi}{A}$ , 由  $B$  查材料的  $B-H$  曲线, 查得磁场强度  $H$ , 进而求磁压降  $Hl$ , 根据  $F = \sum Hl$ , 求得励磁磁动势  $F$ 。

(2) 若给定磁动势  $F$ , 则需采用试探法求磁通  $\Phi$ , 即先假设磁通  $\Phi'$ , 然后求得  $B'$ , 由  $B'$  查  $B-H$  曲线, 得到  $H'$ , 然后求与  $\Phi'$  对应的磁动势  $F'$ ; 若  $F' = F$ , 则  $\Phi'$  即为所求, 否则, 重新假设  $\Phi''$ , 直至  $F'' = F$  为止。

3. 答 电枢铁心是主磁路的一部分, 需要由磁阻小、导磁性能好的材料制成; 另外, 电机在工作时, 电枢铁心中将会产生磁滞、涡流损耗, 使电机的效率降低, 为了抑制磁滞、涡流损耗, 电枢铁心应由损耗系数小的材料制成。硅钢片具有高导磁性, 其磁导率  $\mu_{Fe}$  很大, 是  $\mu_0$  的数千倍; 另外, 其磁滞回线面积小, 磁滞损耗系数小; 硅钢片很薄, 且电阻率大, 可有效抑制涡流损耗。所以, 电机的电枢铁心常用硅钢片制成。

$$4. \text{ 解 } B_1 = \frac{\Phi_1}{K_{Fe} A} = \frac{9.12 \times 10^{-4}}{0.95 \times 4 \times 4 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.6 \text{ T}$$

由  $B_1$  查 DR510 的  $B-H$  曲线, 得  $H_1 = 1.81 \times 10^2 \text{ A/m}$ 。

根据  $\sum Hl = \sum I$ , 可得

$$H_1 l_1 - H_2 l_2 = F_1 - F_2$$

由于

$$l_1 = 3l = 3 \times 0.1 \text{ m} = 0.3 \text{ m}$$

$$l_2 = l = 0.1 \text{ m}$$

$$F_1 = N_1 I_1 = 500 \times 4 \text{ A} = 2000 \text{ A}$$

$$F_2 = N_2 I_2 = 500 \times 3.8 \text{ A} = 1900 \text{ A}$$

$$\text{所以 } H_2 = \frac{H_1 l_1 - F_1 + F_2}{l_2} = \frac{181 \times 0.3 - 2000 + 1900}{0.1} \text{ A/m} = -457 \text{ A/m}$$

由  $|H_2|$  查 DR510 的  $B-H$  曲线, 得  $|B_2| = 1.071 \text{ T}$ , 于是有

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= B_2 A K_{\text{Fe}} = -1.071 \times 16 \times 10^{-4} \times 0.95 \text{ Wb} \\ &= -16.2792 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$\text{因为 } \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } \Phi_3 &= -\Phi_1 - \Phi_2 = (-9.12 \times 10^{-4} + 16.2792 \times 10^{-4}) \text{ Wb} \\ &= 7.1592 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{K_{\text{Fe}} A} = \frac{7.1592 \times 10^{-4}}{16 \times 10^{-4} \times 0.95} \text{ T} = 0.471 \text{ T}$$

由  $B_3 = 0.471 \text{ T}$  查 DR510 的  $B-H$  曲线, 得  $H_3 = 152.2 \text{ A/m}$ , 于是

$$l_3 = 3l - \delta = (0.3 - 2.5 \times 10^{-3}) \text{ m} = 0.2975 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} H_\delta &= \frac{\Phi_3}{\mu_0 A_\delta} = \frac{7.1592 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7} \times (4 + 0.25)^2 \times 10^{-4}} \text{ A/m} \\ &= 3.15411 \times 10^5 \text{ A/m} \end{aligned}$$

$$\text{因为 } N_1 I_1 - N_3 I_3 = H_1 l_1 - H_3 l_3 - H_\delta \delta$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } I_3 &= \frac{N_1 I_1 - H_1 l_1 + H_3 l_3 + H_\delta \delta}{N_3} \\ &= \frac{500 \times 4 - 181 \times 0.3 + 152.2 \times 0.2975 + 315411 \times 0.0025}{500} \text{ A} \\ &= 5.559 \text{ A} \end{aligned}$$

$$5. \text{ 解 } \Phi_m = \frac{U}{4.44 f N} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 1000} \text{ Wb} = 9.91 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$B_m = \frac{\Phi_m}{K_{\text{Fe}} A} = \frac{9.91 \times 10^{-4}}{0.95 \times 6.77 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.541 \text{ T}$$

由  $B_m = 1.54 \text{ T}$  查 DR510 的损耗曲线, 得铁损耗系数  $p_{\text{Fe}} = 5.59 \text{ W/kg}$

$$V = A l = 6.77 \times 10^{-4} \times 0.04 \text{ m}^3 = 2.708 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$m = \rho_{\text{Fe}} V = 7.8 \times 10^3 \times 2.708 \times 10^{-5} \text{ kg} = 0.211224 \text{ kg}$$

$$p_{\text{Fe}} = p_{\text{Fe}} m = 5.59 \times 0.211224 \text{ W} = 1.18 \text{ W}$$

## 第2章 变 压 器

### 2.1 重点和难点

#### 2.1.1 重点

(1) 变压器是根据电磁感应原理进行电能变换的一种静止电磁装置,是从一个电路向另一个电路传递电能或传输信号的一种电器。这两个电路具有同一频率,仅电压或电流数值不等。

变压器中最主要的部件是铁心和绕组。铁心是变压器的磁路,用来实现不同绕组间的良好磁耦合,主磁路必须用硅钢片叠成,以减少涡流损耗;绕组是变压器的电路,其中输入电能的绕组称为一次绕组(又称原绕组或初级绕组),输出电能的绕组称为二次绕组(又称副绕组或次级绕组)。

(2) 额定值是制造厂对变压器在指定工作条件下运行时所规定的一些量值。三相变压器的额定电压  $U_N$  指线电压,三相变压器的额定电流  $I_N$  指线电流,三相变压器的额定容量  $S_N$  是三相容量之和。额定容量  $S_N$  是指在额定状态下,变压器输出的视在功率。三相变压器的相电压  $U_\phi$  和相电流  $I_\phi$  可根据三相绕组的联结方式推算。无论是 Y 联结还是  $\Delta$  联结,三相变压器额定电压、额定电流、额定容量之间的关系均为

$$S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$$

变压器的额定容量按一般定义应为输出的额定视在功率,输入视在功率应是输出视在功率与损耗之和。由于变压器正常运行时功率损耗很小,故可认为输入视在功率和输出视在功率相等,即

$$S_{1N} = S_{2N} = S_N$$

(3) 根据变压器内部磁场的实际分布和所起作用的不同,磁通可分成主磁通和漏磁通两部分;同时交链(又称匝链)一、二次绕组的磁通称为主磁通,主磁通沿铁心闭合,起能量传递媒介的作用,所经磁路是非

线性的;仅交链一次绕组的磁通称为一次绕组漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$ , 仅交链二次绕组的磁通称为二次绕组漏磁通  $\Phi_{2\sigma}$ , 漏磁通主要沿非铁磁物质闭合, 仅起电抗压降的作用, 所经磁路是线性的。

(4) 变压器二次侧额定电压  $U_{2N}$  是指在变压器一次绕组加以额定电压  $U_{1N}$  后, 二次侧开路, 即空载运行状态时二次绕组的端电压  $U_{20}$ 。所以在额定负载运行时二次侧的电压不是额定电压。

(5) 分析变压器各个电磁量之间的关系时, 必须规定各量的正方向, 然后列出方程式。正方向是任意规定的, 正方向不同, 方程式也不一样, 但其结果仍一样。因此, 在一般情况下, 是按惯例规定正方向, 即一次绕组中的电流  $\dot{I}_1$  由电源电压  $\dot{U}_1$  产生, 二次绕组中的电流  $\dot{I}_2$  由二次绕组的感应电动势  $\dot{E}_2$  产生。绕组中的电流与其产生的磁通符合右手螺旋关系, 磁通与其在绕组中感应的电动势符合右手螺旋关系。

(6) 在单相变压器中, 一次绕组的电压  $U_1$  与二次绕组的空载电压  $U_{20}$  之比, 称为变压器的电压比; 一次绕组的感应电动势  $E_1$  与二次绕组的感应电动势  $E_2$  之比, 称为变压器的变比。

当变压器空载运行时, 由于一次侧  $U_1 \approx E_1$ , 二次侧  $U_{20} = E_2$ , 故可近似地认为变压器的电压比与变压器的变比相等, 即

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

对三相变压器来说, 电压比是指一、二次侧相电压之比, 变比是指一、二次侧相电动势之比。

(7) 主磁通  $\Phi_m$  在一次、二次绕组的感应电动势  $E_1$  和  $E_2$  的大小分别为

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

在相位上,  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$  均滞后于  $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ 。

一次绕组的漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$  在一次绕组所产生的感应电动势  $E_{1\sigma}$  的大小为

$$E_{1\sigma} = 4.44 f N_1 \Phi_{1\sigma}$$

在相位上,  $\dot{E}_{1\sigma}$  滞后于  $\dot{\Phi}_{1\sigma} 90^\circ$ 。

同理, 二次绕组的漏磁通  $\Phi_{2\sigma}$  在二次绕组所产生的感应电动势  $E_{2\sigma}$



的大小为

$$E_{2s} = 4.44 f N_2 \Phi_{2s}$$

在相位上,  $E_{2s}$  滞后于  $\Phi_{2s} 90^\circ$ 。

一次、二次绕组的漏磁感应电动势的有效值  $E_{1s}$  和  $E_{2s}$  可表示为电抗压降, 即

$$E_{1s} = -jX_{1s} I_1$$

$$E_{2s} = -jX_{2s} I_2$$

式中:  $X_{1s}$ 、 $X_{2s}$  分别为一次、二次绕组的漏电抗。

同理, 不考虑铁耗时, 一次绕组的感应电动势的有效值  $E_1$  可表示为电抗压降, 即

$$E_1 = -jX_m I_m$$

式中:  $X_m$  为变压器的励磁电抗;  $I_m$  为变压器的励磁电流。

由于变压器铁心中存在铁耗, 考虑铁耗时,  $E_1$  可表示为阻抗压降, 即

$$E_1 = -I_m Z_m = -I_m (R_m + jX_m)$$

式中:  $Z_m$  为变压器的励磁阻抗;  $R_m$  为变压器的励磁电阻。

(8) 为了简化定量计算和得出变压器的等效电路, 引入了归算法。归算的方法是用一个匝数和一次绕组相同的绕组代替二次绕组。归算的原则如下。

① 保持归算前后二次绕组的磁动势大小及空间分布不变, 使得一次绕组的各种物理量在归算前后保持不变。

② 归算前后二次绕组的各种功率和损耗保持不变。

其具体归算方法如下:  $U'_2 = kU_2$ 、 $E'_2 = kE_2$ 、 $I'_2 = \frac{1}{k}I_2$ 、 $R'_2 = k^2R_2$ 、 $X'_{2s} = k^2X_{2s}$ 、 $Z'_{2s} = k^2Z_{2s}$ 、 $Z'_L = k^2Z_L$ 。即单位为 V 的物理量乘以  $k$ , 单位为 A 的物理量除以  $k$ , 单位为  $\Omega$  的物理量乘以  $k^2$ 。

(9) 分析变压器内部的电磁关系时可采用三种方法: 基本方程式、等效电路和相量图。基本方程式是电磁关系的一种数学表达形式, 相量图是基本方程式的图形表示, 而等效电路是从基本方程式出发用电路来模拟实际变压器, 因此, 三者是完全一致的。知道其中一种就可以推

导出其他两种。在实际工作中,可根据具体问题灵活运用。

变压器负载时的基本方程组为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_{1\sigma} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_{1\sigma})$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_{2\sigma} = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_{2\sigma})$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m = -\dot{I}_m (R_m + jX_m)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L$$

式中:  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{I}_1$  分别为一次绕组的相电压、相电动势、相电流;  $R_1$ 、 $X_{1\sigma}$ 、 $Z_{1\sigma}$  分别为一次绕组每相的电阻、漏电抗、漏阻抗;  $\dot{U}'_2$ 、 $\dot{E}'_2$ 、 $\dot{I}'_2$  分别为二次绕组相电压、相电动势、相电流的归算值;  $R'_2$ 、 $X'_{2\sigma}$ 、 $Z'_{2\sigma}$  分别为二次绕组每相的电阻、漏电抗、漏阻抗的归算值;  $\dot{I}_m$ 、 $R_m$ 、 $X_m$ 、 $Z_m$  分别为励磁电流、励磁电阻、励磁电抗、励磁阻抗;  $Z'_L$  为负载阻抗的归算值。

由于解基本方程组比较复杂,因此实际工作中,做定性分析时可采用相量图,做定量计算时则可采用等效电路。用等效电路计算时,除采用 T 形等效电路外,在实际应用中,常采用将励磁支路移到  $Z_{1\sigma}$  之前的近似等效电路或将励磁支路忽略的简化等效电路。

(10) 变压器等效电路的参数,可以用开路试验(又称空载试验)和短路试验来确定。由开路试验可以算出变压器的励磁阻抗  $Z_m$ 、励磁电阻  $R_m$  和励磁电抗  $X_m$ ; 由短路试验可以算出变压器的短路阻抗  $Z_K$ 、短路电阻  $R_K$  和短路电抗  $X_K$ 。

由于变压器的参数皆为一相的数值,因此,求三相变压器的参数时,必须根据一相的损耗、相电压和相电流来计算。

由于绕组电阻随温度变化而变化,而试验时的温度和变压器实际运行的温度不同,因此按国家标准规定,测出的电阻应换算成  $75^\circ\text{C}$  时的数值。对于铜线变压器,有

$$R_{K(75^\circ\text{C})} = R_K \frac{234.5 + 75}{234.5 + t_0}$$

$$Z_{K(75^\circ\text{C})} = \sqrt{R_{K(75^\circ\text{C})}^2 + X_K^2}$$

式中:  $t_0$  为试验时的室温;对于铝线变压器,常数 234.5 应改为 228。

(11) 三相变压器磁路系统可分成各相磁路彼此无关的三相变压器组和三相磁路彼此相关的三相心式变压器两种。

当变压器的磁路饱和时,正弦变化的励磁电流产生的主磁通为平顶波(主要含3次谐波分量),因而感应的电动势为非正弦波;同理,当变压器的磁路饱和时,欲得到正弦变化的主磁通,则需要励磁电流应为尖顶波(主要包含3次谐波分量)。

(12) 三相变压器的一次绕组和二次绕组主要有两种联结法:星形(Y)联结和三角形( $\Delta$ )联结。表示变压器一次、二次绕组联结法的组合称为联结组,例如:Yy、Yyn、Yd、YNd、Dy、Dd等。其中,Y或y表示Y联结;D或d表示 $\Delta$ 联结;N或n表示有中性点引出的联结。前面的大写字母表示一次绕组的联结法,后面的小写字母表示二次绕组的联结法。

三相绕组采用不同的联结时,一次绕组的线电动势(或线电压)与二次绕组的线电动势(或线电压)之间可以形成不同的相位,为了表明一、二次绕组线电动势(或线电压)之间的相位关系,通常采用“时钟表示法”。

三相变压器一、二次绕组对应的线电动势(或线电压)的相位差与绕组的绕向、首末端标志和联结组有关,各种联结组的这种相位差都是 $30^\circ$ 的整数倍,用时钟的时数表示,称为联结组标号。联结组标号等于二次绕组线电动势(或线电压)滞后于一次绕组对应的线电动势(或线电压)的相位差除以 $30^\circ$ 。Yy和Dd联结组标号为偶数,Yd和Dy联结组标号为奇数。常用的联结组标号有Yyn0、Yd11、YNd11、YNy0、Yy0等。

(13) 有些物理量如电压、电流、阻抗、功率等有时要用标幺值来表示和计算。所谓标幺值,就是某一物理量的实际值与选定的同单位的基值之比。在变压器或电机中,常取各物理量的额定值作为基值。将各物理量的标幺值乘以100,就变成额定值的百分值。

采用标幺值具有下列优点。

① 不论变压器的容量相差多大,用标幺值表示的参数及性能数据的变化范围均很小,这就便于对不同容量的变压器进行比较。例如,空载电流的标幺值 $I_0^*$ 为 $0.02 \sim 0.10$ ,短路阻抗的标幺值 $Z_k^*$ 为

0.04 ~ 0.10。

② 采用标么值表示时,一、二次侧各物理量不需要进行归算了。这是因为用标么值表示时,归算值的标么值与未归算值的标么值相等。例如:

$$R_2^* = \frac{R_2}{Z_{2N}} = \frac{R_2}{\frac{U_{2N}}{I_{2N}}} = \frac{R_2}{\frac{U_{1N}/k}{kI_{1N}}} = \frac{k^2 R_2}{\frac{U_{1N}}{I_{1N}}} = \frac{R_2'}{Z_{1N}} = R_2'^*$$

③ 采用标么值后,各物理量的数值简化了,如各物理量的额定值的标么值等于1,因此使计算很方便。

④ 采用标么值后,某些物理量还具有相同的数值,例如,短路阻抗的标么值  $Z_K^*$  等于阻抗电压的标么值  $U_K^*$ ,即

$$Z_K^* = \frac{Z_K}{Z_N} = \frac{Z_K}{\frac{U_N}{I_N}} = \frac{I_N Z_K}{U_N} = U_K^*$$

(14) 电压调整率的确定方法。在变压器一次侧加上额定频率的额定电压,并保持不变。二次侧空载时,空载电压  $U_{20\%} = U_{2N\%}$ 。当二次侧加负载时,变压器绕组阻抗将产生阻抗压降,使二次侧电压随负载电流的变化而变化。当负载的功率因数为常值时,二次侧空载电压  $U_{20\%}$  与负载电压  $U_{2\%}$  的算术差,用二次侧额定电压的百分数表示的数值,称为变压器的电压调整率(或称电压变化率),用  $\Delta u$  表示,即

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{U_{20\%} - U_{2\%}}{U_{2N\%}} \times 100\% = \frac{U_{1N\%} - U'_{2\%}}{U_{1N\%}} \times 100\% \\ &= I^* (R_K^* \cos\varphi_2 + X_K^* \sin\varphi_2) \times 100\% \end{aligned}$$

电压调整率随着负载电流的增加而正比增大,此外还与变压器的参数和负载的性质有关。当负载为感性时,  $\varphi_2$  角为正值,故电压调整率恒为正值,即负载时的二次电压总比空载时低;当负载为容性时,  $\varphi_2$  角为负值,电压调整率可能成为负值,即负载时的二次电压可能高于空载电压。

当负载为额定负载( $I^* = 1$ )、功率因数为指定值(通常为0.8滞后)时的电压调整率,称为额定电压调整率,用  $\Delta u_N$  表示。额定电压调整率是变压器的主要性能指标之一。

(15) 变压器在能量转换过程中,将产生铜耗和铁耗,致使输出功率小于输入功率。输出功率  $P_2$  与输入功率  $P_1$  之比,称为效率,用  $\eta$  表示。效率的高低反映了变压器运行的经济性,所以它是表示变压器运行性能的一个重要指标。按定义效率为

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left[ 1 - \frac{\sum p}{P_1} \right] \times 100\% \\ &= \left( 1 - \frac{P_0 + I_2^{*2} P_{KN}}{S_N I_2^* \cos\varphi_2 + P_0 + I_2^{*2} P_{KN}} \right) \times 100\%\end{aligned}$$

式中:  $P_0$  为变压器的空载损耗,空载损耗  $P_0$  近似等于铁耗  $p_{Fe}$ ;  $P_{KN}$  为额定电流时变压器的短路损耗,短路损耗  $P_{KN}$  近似等于铜耗  $p_{Cu}$ 。

变压器的铜耗和铁耗均包括基本损耗和杂散损耗。由于铜耗与负载电流的平方成正比,因而也称为可变损耗。当频率一定时,铁耗与  $B_m^2$  或  $U_1^2$  成正比,由于变压器的一次电压保持不变 ( $U_1 = U_{1N}$ ),所以铁耗可视为不变损耗。当变压器的可变损耗与不变损耗相等时,其效率达最大值。

(16) 在发电厂和变电所中,常常采用多台变压器并联运行的方式。并联运行是将两台或多台变压器的一次绕组和二次绕组分别并联到一次侧和二次侧的公共母线上,同时对负载供电的运行方式。

并联运行的优点:

- ① 可以提高供电的可靠性;
- ② 可以根据负载的大小调整投入并联运行变压器的台数,以提高运行效率;
- ③ 可以减少总的备用容量。

变压器并联运行的最理想情况是:

① 空载时,并联的各变压器之间没有环流,这样,空载时各变压器二次侧没有铜耗,一次侧的铜耗也比较小;

② 负载时,各变压器所承担的负载应按其容量的大小成比例分配,防止其中某台欠载或过载,使并联组的容量得到充分利用;

③ 负载时,各变压器二次侧电流同相位,这样在总的负载电流一定时,各变压器所分担的电流最小;反之,如果各变压器二次侧电流一定,

则共同承担的负载电流最大。

为了达到上述理想的并联条件,并联运行的各变压器应满足如下要求:

- ① 各变压器的额定电压应相等,即各变压器的电压比应当相等;
- ② 各变压器的联结组标号必须相同;
- ③ 各变压器短路阻抗的标么值要相等,阻抗角要相同。

(17) 自耦变压器的特点是一、二次绕组之间不仅有磁的联系,还有电的联系。自耦变压器的额定容量可以分成两部分:一部分容量对应的功率是公共绕组和串联绕组之间通过电磁感应关系传递给负载的,即通常所说的电磁功率,这一容量决定了变压器的主要尺寸和材料消耗,是变压器设计的依据,称为自耦变压器的计算容量;另一部分容量对应的功率是一次侧电流通过传导关系直接传递给负载的,称为传递功率。由于传递功率不需要增加变压器的计算容量,且是普通两绕组变压器所没有的,所以自耦变压器比两绕组变压器有一系列优点。当自耦变压器的电压比  $k_a$  愈接近 1 时,计算容量愈小,自耦变压器的优点愈显著,因此,自耦变压器适用于在一、二次侧电压相差不大的场合,一般来说  $k_a < 2$ 。

(18) 电压互感器和电流互感器的工作原理与变压器相同。由于电压表的阻抗很大,电压互感器的运行情况,相当于变压器的空载运行;由于电流表的阻抗很小,电流互感器的运行情况,相当于变压器的短路运行。

在使用电压互感器时,二次侧不能短路,否则会产生很大的短路电流。为了安全起见,电压互感器的二次绕组连同铁心一起,必须可靠接地。另外,电压互感器有一定的额定容量,使用时二次侧不宜接过多的仪表,以免电流过大引起较大的漏抗压降,从而影响电压互感器的准确度。

在使用电流互感器时,二次侧不允许开路。如果二次侧开路,电流互感器成为空载运行,此时,一次侧被测线路电流成了励磁电流,使铁心内的磁通密度比额定情况增加许多倍。这一方面将使二次侧感应出很高的电压,可能使绝缘击穿,同时对测量人员也很危险;另一方面,铁

心内磁密增加后,铁耗会大大增加,使铁心过热,影响电流互感器的性能,甚至把它烧坏。因此,对运行中的电流互感器,如需在二次侧拆装仪表时,必须先将二次侧短路才能拆装,而且,在二次侧不允许装设熔断器或闸刀开关。为了安全起见,电流互感器二次侧必须可靠地接地。

### 2.1.2 难点

(1) 在变压器中,既有磁路问题,又有电路问题。为了把电磁场问题转化成电路问题,引入了电路参数:励磁阻抗  $Z_m$  ( $Z_m = R_m + jX_m$ )、一次绕组漏电抗  $X_{1\sigma}$  和二次绕组漏电抗  $X_{2\sigma}$ 。

励磁电阻  $R_m$  不是一个实际存在的电阻,它只是一个代表铁耗  $p_{Fe}$  的等效电阻,其上消耗的功率等于铁耗,因此  $R_m = \frac{p_{Fe}}{m_1 I_m^2}$ 。励磁电抗  $X_m$  与主磁通  $\Phi_m$  对应,  $X_{1\sigma}$  和  $X_{2\sigma}$  分别与一次绕组的漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$  和二次绕组的漏磁通  $\Phi_{2\sigma}$  对应,它们分别与电源频率  $f$ 、匝数的平方、对应磁通所经磁路的磁导成正比,即

$$X_m = \omega L_m = 2\pi f N_1^2 \Lambda_m \propto f N_1^2 \Lambda_m$$

$$X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma} = 2\pi f N_1^2 \Lambda_{1\sigma} \propto f N_1^2 \Lambda_{1\sigma}$$

$$X_{2\sigma} = \omega L_{2\sigma} = 2\pi f N_2^2 \Lambda_{2\sigma} \propto f N_2^2 \Lambda_{2\sigma}$$

由于  $\Phi_m$  经铁心闭合,会受铁心饱和的影响,故  $X_m$  不是常数。随着铁心饱和程度的提高,铁心的磁导率减小,主磁路的磁阻将增大,与之对应的磁导  $\Lambda_m$  将减小,  $X_m$  变小。由于  $\Phi_{1\sigma}$  和  $\Phi_{2\sigma}$  主要经非铁磁物质闭合,基本上不受铁心饱和的影响,故  $X_{1\sigma}$  和  $X_{2\sigma}$  基本上是常数。

另外,由于铁磁材料的磁导率  $\mu_{Fe}$  远远大于真空磁导率  $\mu_0$ , 因此  $X_m$  远远大于  $X_{1\sigma}$  和  $X_{2\sigma}$ 。

(2) 变压器的额定容量  $S_N$  是指变压器的额定视在功率(单位为 VA 或 kVA),而不是指变压器的额定功率(单位为 W 或 kW)。变压器一、二次侧的额定容量相等,即  $S_{1N} = S_{2N} = S_N$ ;而变压器一、二次侧的功率截然不同,即  $P_1 \neq P_2$ ,两者不能混淆。

(3) 亦可以把变压器一次侧各物理量归算到二次侧,以得到归算到二次侧的 T 形等效电路。一次侧各物理量归算到二次侧时,电流乘以  $k$ ,

电压除以  $k$ , 阻抗除以  $k^2$ , 即  $I_1'' = kI_1$ 、 $U_1'' = \frac{1}{k}U_1$ 、 $E_1'' = \frac{1}{k}E_1$ 、 $R_1'' = \frac{1}{k^2}R_1$ 、 $X_{1\sigma}'' = \frac{1}{k^2}X_{1\sigma}$ 、 $Z_{1\sigma}'' = \frac{1}{k^2}Z_{1\sigma}$ 。由于通常归算到一次侧的 T 形等效电路中的励磁参数  $R_m$ 、 $X_m$ 、 $Z_m$  是从一次侧得到的参数, 所以此时也应向二次侧归算, 即  $R_m'' = \frac{1}{k^2}R_m$ 、 $X_m'' = \frac{1}{k^2}X_m$ 、 $Z_m'' = \frac{1}{k^2}Z_m$ 。

(4) 变压器进行空载试验(或称开路试验)和短路试验求取参数时应注意, 电源电压加在哪一侧, 则测得的参数即为从哪一侧看进去而得到的参数(即相当于归算到哪一侧的参数)。在变压器一次侧加电压做空载试验时, 测得的励磁参数为  $Z_m$ 、 $R_m$ 、 $X_m$ ; 在变压器二次侧加电压做空载试验时, 测得的励磁参数为  $Z_m''$ 、 $R_m''$ 、 $X_m''$ , 若需将其归算到一次侧, 则应分别乘以  $k^2$ , 即  $R_m = k^2 R_m''$ 、 $X_m = k^2 X_m''$ 、 $Z_m = k^2 Z_m''$ 。同理, 在变压器一次侧加电压做短路试验时, 测得的短路参数为  $Z_K = Z_1 + Z_2'$ 、 $R_K = R_1 + R_2'$ 、 $X_K = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$ ; 在二次侧加电压做短路试验时, 测得的短路参数为  $Z_K' = Z_{1\sigma}' + Z_{2\sigma}$ 、 $R_K' = R_1' + R_2$ 、 $X_K' = X_{1\sigma}' + X_{2\sigma}$ , 若需将其归算到一次侧, 则应分别乘以  $k^2$ , 即  $Z_K = k^2 Z_K'$ 、 $R_K = k^2 R_K'$ 、 $X_K = k^2 X_K'$ 。

(5) 在三相变压器中, 三相励磁电流中的 3 次谐波分量大小相等、相位相同, 其能否流通与绕组联结法有关。主磁通中的 3 次谐波分量也是大小相等、相位相同, 其能否沿铁心闭合则与三相磁路系统有关。

对于 Yy 联结的三相变压器, 3 次谐波电流不能流通, 励磁电流接近于正弦波, 当磁路饱和时, 主磁通为平顶波。对于 Yy 联结的三相变压器组, 由于三相磁路彼此无关, 3 次谐波磁通能沿铁心闭合, 因铁心磁阻小, 故 3 次谐波磁通较强, 相电动势畸变为尖顶波, 其中包含较强的 3 次谐波电动势。对于 Yy 联结的三相心式变压器, 由于三相磁路彼此相关, 3 次谐波磁通不能沿铁心闭合, 只能经油、油箱壁等形成闭合回路, 对应的磁路磁阻大, 故 3 次谐波磁通很小, 主磁通仍接近于正弦波, 相电动势也接近于正弦波。因此, 三相变压器组不能采用 Yy 联结, 而三相心式变压器则可以采用 Yy 联结。

对于 Dy 联结的三相变压器, 一次侧励磁电流中的 3 次谐波电流可



以流通,故主磁通及感应电动势为正弦波。

对于 Yd 联结的三相变压器,一次侧励磁电流中的 3 次谐波电流不能通过,因而磁路饱和时,主磁通和一次、二次侧相电动势中将可能含有 3 次谐波,但因二次侧闭合,三角形绕组中的 3 次谐波环流同样起励磁作用,故相电动势的波形也接近于正弦波。

上述分析表明,为使三相变压器中相电动势的波形接近于正弦波,一次或二次绕组中最好有一侧为  $\triangle$  联结。

(6) 在变压器中,当各物理量采用标幺值表示和计算时,其基值的选取方法如下。

① 对于单相变压器,一次侧电压、电动势的基值为  $U_{1N}$ ,一次侧电流的基值为  $I_{1N}$ ,一次绕组的电阻、漏电抗、阻抗的基值为  $Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}}$ ,一次侧功率和损耗的基值为  $S_{1N} = U_{1N} I_{1N}$ ;二次侧电压、电动势的基值为  $U_{2N}$ ,二次侧电流的基值为  $I_{2N}$ ,二次绕组的电阻、漏电抗、阻抗及负载阻抗的基值为  $Z_{2N} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}}$ ,二次侧的功率和损耗的基值为  $S_{2N} = U_{2N} I_{2N}$ 。而二次侧各物理量的归算值的基值(因已归算到一次侧)应与一次侧各物理量的基值相同。

② 对于三相变压器,相电压和相电动势的基值应为其对应侧的额定相电压  $U_{N\phi}$ ,相电流的基值应为其对应侧的额定相电流  $I_{N\phi}$ ,绕组的电阻、漏电抗、阻抗和负载阻抗的基值应为其对应侧的一相绕组的额定阻抗  $Z_N = \frac{U_{N\phi}}{I_{N\phi}}$ 。三相功率和损耗的基值应为三相额定容量  $S_N = 3U_{N\phi} I_{N\phi} = \sqrt{3}U_N I_N$ 。

③ 在三相系统中,线电压(或线电动势)和线电流亦可用标幺值表示,其基值应为其对应侧的线电压和线电流的额定值。

(7) 判定三相变压器的联结组标号应采用相量图,画相量图的步骤如下。

① 根据一次绕组的联结法,画出一侧的电压相量图,并画出其线电压三角形(注意:三角形中线 OA 指向钟面的 12, A、B、C 三相相电压

为顺时针方向)。

② 根据二次侧 a 相绕组所在位置,并参考与其对应的一次绕组,画出 a 相的相电压  $\dot{U}_a$  的相量(注意:若二次绕组的首端与一次绕组的首端为同名端,则  $\dot{U}_a$  与对应的一次绕组的相电压相量平行,且方向相同;反之,若二次绕组的首端与一次绕组的首端不是同名端,则  $\dot{U}_a$  与对应的一次绕组的相电压相量平行,但方向相反)。

③ 参考步骤 ②,画出二次绕组的  $\dot{U}_b$  和  $\dot{U}_c$ 。

④ 根据二次绕组的联结法,把  $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$  联结成星形或三角形(注意:各电压相量应平移)。

⑤ 画出二次侧线电压三角形。

⑥ 将二次侧线电压三角形平移,使一次、二次侧两个线电压三角形的重心 O 与 o 重合。

⑦ 比较两个线电压三角形的中线 OA 与 oa 的相位差(注意:相位差为以 OA 为基准,顺时针方向至 oa 的角度)。

⑧ 计算联结组标号,标号 =  $\frac{\text{OA 与 oa 的相位差}}{30^\circ}$ 。

(8) 变比不等的变压器并联运行时,会在变压器内部产生环流。环流  $I_c$  的大小可按下式计算:

$$I_c = \frac{\dot{U}_1 \left( \frac{1}{k_I} - \frac{1}{k_{II}} \right)}{Z''_{KI} + Z''_{KII}}$$

式中:  $k_I$ 、 $k_{II}$  为变压器 I 和变压器 II 的电压比;  $Z''_{KI}$ 、 $Z''_{KII}$  为变压器 I 和变压器 II 归算到二次侧的短路阻抗。

(9) 短路阻抗标么值不相等的变压器并联运行时,各台变压器按与短路阻抗标么值的倒数成正比的关系分配负载,短路阻抗标么值小的变压器先达到满载。负载分配关系为

$$\begin{cases} \dot{I}_I^* \dot{I}_{IN} + \dot{I}_{II}^* \dot{I}_{II N} + \cdots + \dot{I}_n^* \dot{I}_{nN} = I \\ \dot{I}_I^* : \dot{I}_{II}^* : \cdots : \dot{I}_n^* = \frac{1}{Z_{KI}^*} : \frac{1}{Z_{KII}^*} : \cdots : \frac{1}{Z_{Kn}^*} \end{cases}$$

式中:  $I$  为总负载电流;  $\dot{I}_n^*$  为第  $n$  台变压器二次侧电流标么值;  $\dot{I}_{nN}$  为第  $n$

台变压器二次侧额定电流;  $Z_{kn}^*$  为第  $n$  台变压器短路阻抗标么值。

当忽略各台变压器短路阻抗角的差别时,上式的二次侧电流的相量和可变为算术和,复数比将变为模之比,即有

$$\begin{cases} I_1^* I_{1N} + I_2^* I_{2N} + \cdots + I_n^* I_{nN} = I \\ I_1^* : I_2^* : \cdots : I_n^* = \frac{1}{Z_{K1}^*} : \frac{1}{Z_{K2}^*} : \cdots : \frac{1}{Z_{Kn}^*} \end{cases}$$

各变压器的负载分配也可以用容量表示为

$$\begin{cases} S_1^* S_{1N} + S_2^* S_{2N} + \cdots + S_n^* S_{nN} = S \\ S_1^* : S_2^* : \cdots : S_n^* = \frac{1}{Z_{K1}^*} : \frac{1}{Z_{K2}^*} : \cdots : \frac{1}{Z_{Kn}^*} \end{cases}$$

式中:  $S$  为总负载容量;  $S_{nN}$  为第  $n$  台变压器的额定容量;  $S_n^*$  为第  $n$  台变压器分担的负载容量标么值,  $S_n^* = \frac{S_n}{S_{nN}}$ 。

## 2.2 习题详解

2-1 什么叫变压器的主磁通?什么叫变压器的漏磁通?空载和负载时,主磁通的大小取决于哪些因素?

答 通过铁心并与一次和二次绕组同时交链的磁通,称为主磁通  $\Phi_m$ 。主磁通  $\Phi_m$  沿铁心闭合,在一次、二次绕组内产生感应电动势  $E_1$  和  $E_2$ ,起传递电磁功率的作用。

仅与一个绕组交链,且主要通过空气或油闭合的磁通,称为漏磁通。由电流  $i_1$  所产生,且仅与一次绕组相交链的磁通,称为一次绕组的漏磁通,用  $\Phi_{1\sigma}$  表示;由电流  $i_2$  所产生,且仅与二次绕组相交链的磁通,称为二次绕组的漏磁通,用  $\Phi_{2\sigma}$  表示。漏磁通通过非磁性物质闭合,只起电抗压降作用而不直接参与能量传递。

空载时,因为  $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ ,所以,主磁通与电源电压  $U_1$ 、电源频率  $f$  和一次绕组匝数  $N_1$  有关。

负载时,二次绕组中将有电流  $I_2$  通过,同理,一次绕组中的电流将由空载时的  $I_0$  变为负载时的  $I_1$ ,由于其一次绕组的漏阻抗压降  $I_1 Z_{1\sigma}$  很小,负载时仍有  $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ ,故变压器负载时的主磁通约等于空载时的主磁通,即主磁通  $\Phi_m$  约为常值。

**2-2** 一台 50Hz 的变压器接到 60 Hz 的电源上运行时,若额定电压不变,问励磁电流、铁耗、漏抗会怎样变化?

**答** 对一台已经制成的变压器,其绕组的匝数和磁路的尺寸均一定。由  $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$  可知,当电源电压  $U_1$  和一次绕组的匝数  $N_1$  一定时,变压器的磁通  $\Phi_m$  与电源频率  $f$  成反比,所以,变压器接到 60 Hz 的电源上运行时,主磁通  $\Phi_m$  将减小。

由于变压器的磁路的尺寸未变,若主磁通  $\Phi_m$  减小,将使变压器各段磁路的磁通密度  $B_k$  和磁场强度  $H_k$  减小,同理使各段磁位降  $H_k l_k$  和总磁位降  $\sum H_k l_k$  减小,即产生主磁通  $\Phi_m$  所需的励磁磁动势  $N_1 i_m$  减小,因变压器一次绕组的匝数  $N_1$  一定,故变压器的励磁电流  $i_m$  将减小。

因为铁耗  $p_{Fe} \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 m$ ,对于同一台变压器,铁心的损耗系数  $C_{Fe}$  和铁心的质量  $m$  均一定,所以,铁心损耗  $p_{Fe}$  与磁通交变的频率(即产生该磁通的励磁电流的频率)  $f$  的 1.3 次方、磁通密度  $B_m$  的平方成正比。而根据题意,由前面的分析已知主磁通  $\Phi_m$  与电源频率  $f$  成反比,由于磁路尺寸一定时,磁通密度  $B_m$  与主磁通  $\Phi_m$  成正比,因此,磁通密度  $B_m$  也与电源频率  $f$  成反比。由  $p_{Fe} \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 m$  可知,当磁通密度  $B_m$  与频率  $f$  成反比变化时,铁耗的变化将取决于磁通密度  $B_m$ ,故电源频率  $f$  升高,将引起磁通密度  $B_m$  减小,而铁耗  $p_{Fe}$  也将随之减小。

因为漏电抗  $X_s = \omega L_s$ ,而漏电感  $L_s = N^2 \Delta_s$ ,对于已制成的变压器,其磁路的尺寸和绕组的匝数  $N$  均一定,所以漏电感  $L_s$  与漏磁路的磁导  $\Delta_s$  成正比。由于漏磁路的主要部分是空气或油,故漏磁导  $\Delta_s$  是常值,相应的漏电感  $L_s$  亦是常值。由此可知,漏电抗  $X_s$  与磁通交变的角频率  $\omega$  成正比。因此,电源频率  $f$  的升高引起磁通交变的频率  $f$  和角频率  $\omega (= 2\pi f)$  升高,变压器的漏电抗  $X_s$  也将随之增大。

**2-3** 在导出变压器的等效电路时,为什么要进行归算?归算是在什么条件下进行的?

**答** 通过对变压器空载运行和负载运行时的理论分析,可以得到变压器的基本方程组。利用这组方程,便能对变压器进行定量计算。但是,解联立方程组是相当繁杂的,并且由于电力变压器的变比(又称电压比)  $k$  较大,使变压器一次、二次绕组的电流、电压、阻抗等相差很大,

计算时不方便,也不便于比较,画相量图更是困难。因此,在研究变压器的运行问题时,希望有一个既能正确反映变压器内部电磁关系,又便于工程计算的等效电路,来代替既有电路,又有磁路和电磁感应联系的实际变压器。

为建立等效电路,除了需要把一次和二次侧漏磁通产生的感应电动势作为漏电抗压降,把主磁通和铁心线圈产生的阻抗作为励磁阻抗来处理外,还要解决如何把电压和电流在电的方面没有直接联系的一次和二次电路联结在一起的问题,为此需要进行绕组归算(又称绕组折算)。

所谓绕组归算法就是把各绕组的匝数转换成相同匝数的方法。通常是把二次绕组归算到一次绕组,也就是把二次绕组的匝数转换成一次绕组的匝数,而一次绕组的匝数不变。值得注意的是,归算法仅仅是分析变压器的一种方法,在归算时应不改变变压器原有的电磁关系和电磁过程,即归算前后的磁动势平衡关系、功率传递、损耗和漏磁场储能等均应保持不变。

绕组归算的具体要求如下。

① 在进行二次绕组电流的归算时,应根据归算前后二次绕组产生的磁动势不变的原则。

② 在进行二次绕组电动势的归算时,应注意到归算前后主磁通和漏磁通都没有改变,即电动势与匝数成正比。

③ 在进行二次绕组电阻的归算时,应根据归算前后损耗不变的原则。

④ 在进行二次绕组漏电抗的归算时,应根据归算前后的漏磁场储能不变的原则。

⑤ 在进行二次绕组端电压的归算时,应根据归算前后功率不变的原则,即归算前后二次绕组输出的视在功率不应该改变。

**2-4 利用 T 形等效电路进行实际问题计算时,算出的一次和二次电压、电流和损耗、功率是否均为实际值,为什么?**

**答** 对于把二次绕组归算到一次绕组所得到的 T 形等效电路,用其计算出的一次绕组电压  $U_1$  和电流  $I_1$  均为实际值,而用其计算出的二

次绕组电压  $U'_2$  和电流  $I'_2$  均为归算值。

对于把一次绕组归算到二次绕组所得到的 T 形等效电路, 用其计算出的一次绕组电压  $U'_1$  和电流  $I'_1$  均为归算值, 而用其计算出的二次绕组电压  $U_2$  和电流  $I_2$  均为实际值。

根据变压器绕组归算的原则(见本节 2-3 题)可知, 无论采用上述哪一种 T 形等效电路, 计算出的损耗、功率均为实际值。例如, 归算前后

二次绕组的铜(铝)耗不变, 即  $I_2'^2 R_2' = \left(\frac{I_2}{k}\right)^2 (k^2 R_2) = I_2^2 R_2$ 。

## 2-5 变压器的励磁阻抗和等效漏阻抗如何测定?

答 变压器的等效电路是一个四端网络。它的参数可以通过空载试验和短路试验测出。

空载试验亦称开路试验, 可以测定变压器的励磁阻抗。为了安全和便于试验, 变压器的空载试验通常在低压侧进行, 即将额定频率的额定电压加在低压绕组上, 而高压绕组侧开路, 并同时测量此时的低压绕组外施的电压  $U$ 、空载电流  $I_0$  和相应的空载功率  $P_0$ 。

对于升压变压器, 应在一次绕组上加电压  $U_1$ 。根据空载试验所得的  $U_1$ 、 $I_0$ 、 $P_0$ , 便可算出变压器的励磁参数:  $Z_m \approx \frac{U_1}{I_0}$ ,  $R_m \approx \frac{P_0}{I_0^2}$ ,  $X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$ 。

对于降压变压器, 应在二次绕组上加电压  $U_2$ 。根据空载试验所得的  $U_2$ 、 $I_0$ 、 $P_0$ , 便可算出归算到二次侧的变压器的励磁参数:  $Z_m'' \approx \frac{U_2}{I_0}$ ,  $R_m'' \approx \frac{P_0}{I_0^2}$ ,  $X_m'' = \sqrt{Z_m''^2 - R_m''^2}$ 。

如果需要得到归算到一次侧的数值, 还必须乘以  $k^2$ , 即  $Z_m = k^2 Z_m''$ ,  $R_m = k^2 R_m''$ ,  $X_m = k^2 X_m''$ 。这里  $k = N_{\text{高压}}/N_{\text{低压}}$ 。

短路试验亦称负载试验, 可以用来测定变压器的短路阻抗(又称等效漏阻抗)。为了便于测量, 变压器的短路试验通常在高压侧进行, 即将低压绕组短路, 在高压绕组上加一可调的低电压。调节外加的低电压, 使短路电流达到额定电流, 测量此时的外施电压(又称短路电压)  $U_K$ 、输入电流(又称短路电流)  $I_K$  和输入功率(又称短路损耗)  $P_K$ 。

对于降压变压器,应在一次绕组上加一可调的低电压 $U_1$ 。根据短路试验所得的 $U_K$ 、 $I_K$ 、 $P_K$ ,便可算出变压器的短路参数: $Z_K \approx \frac{U_K}{I_K}$ ,  $R_K \approx \frac{P_K}{I_K^2}$ ,  $X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$ 。

短路试验时,绕组的温度与实际运行时不一定相同。因此,按国家标准规定,测出的电阻应换算到 $75^\circ\text{C}$ 时的数值。若绕组为铜线绕组,电阻可用下式换算:

$$R_{K(75^\circ\text{C})} = R_K \frac{234.5 + 75}{234.5 + t_0}$$

式中: $t_0$ 为试验时的室温。

若绕组为铝线绕组,上式中的常数234.5应改为228。

上述测定变压器参数的方法也适用于三相变压器,但应采用三相变压器的相电压、相电流和一相绕组的功率(或损耗)进行计算。同理,计算出的变压器的参数是三相变压器中一相绕组的参数。

## 2-6 三相变压器绕组联结时,什么是组号的“时钟表示法”?

**答** 三相变压器的绕组采用不同的联结时,一次绕组的线电压(或线电动势)与二次绕组的线电压(或线电动势)之间(例如 $\dot{U}_{AB}$ 与 $\dot{U}_{ab}$ 之间或 $\dot{E}_{AB}$ 与 $\dot{E}_{ab}$ 之间)可以形成不同的相位。为了表明一、二次侧线电压(或线电动势)之间的相位关系,通常采用“时钟表示法”。

判定三相变压器一、二次侧线电压(或线电动势)之间的相位差,即判定三相变压器的联结组号有多种方法,常用的有以下两种。

① 根据三相变压器一、二次绕组的同名端和绕组的联结方法,分别画出一、二次绕组的电压(或电动势)相量图。然后把一、二次绕组两个线电压(或线电动势)三角形的重心 $O$ 和 $o$ 重合,把一次侧线电压(或线电动势)三角形的一条中线(如 $OA$ )作为时钟的长针,指向钟面的12;再把二次侧线电压(或线电动势)三角形中对应的中线(如 $oa$ )作为时钟的短针,它所指的钟点就是该联结组的组号。

② 根据三相变压器一、二次绕组的同名端和绕组的联结方法,分别画出一、二次绕组的电压(或电动势)相量图。然后将两个相量图中的 $A$ 点和 $a$ 点重合,把一次绕组的线电压 $\dot{U}_{AB}$ (或线电动势 $\dot{E}_{AB}$ )作为

时钟的长针,指向钟面的 12;再把二次绕组相量图中对应的线电压  $U_{ab}$  (或线电动势  $E_{ab}$ ) 作为时钟的短针,它所指的钟点就是该联结组的组号。

**2-7** 三相变压器的标准联结组有几种?常用的有几种?为什么三相变压器组不宜采用 Yy 联结?

**答** 三相变压器联结组的种类很多,为了制造和并联运行时的方便,我国规定 Yyn0、Yd11、YNd11、YNy0 和 Yy0 五种作为标准联结组。五种标准联结组中,以前三种最为常用。

由于变压器的磁路由铁磁材料构成的,而铁磁材料的磁化曲线是非线性的,当铁心磁路达到饱和时,为使主磁通成为正弦波,将需要波形为尖顶波的励磁电流;反之,当励磁电流为正弦波时,其产生的主磁通的波形将成为平顶波。

三相变压器运行时,为使绕组中感应出的相电动势为正弦波,则需要磁路中的主磁通为正弦波;但是,当磁路达到饱和时,为使主磁通成为正弦波,励磁电流将变成尖顶波。此时励磁电流中除含有基波分量  $i_{m1}$  外,还含有一定的 3 次谐波分量  $i_{m3}$ 。因为 3 次谐波电流大小相等、相位相同,所以,励磁电流中的 3 次谐波能否在变压器的三相绕组中流通,将直接影响到主磁通和相电动势的波形。

当三相变压器为 Yy 联结组时,一次和二次绕组都是 Y 联结且无中线,励磁电流中的 3 次谐波分量不能流通,故励磁电流将接近于正弦波。若工作点位于磁路饱和段,主磁通的波形将成为平顶波,此时,主磁通中除基波分量  $\Phi_1$  外,还将出现 3 次谐波分量  $\Phi_3$ ,其 3 次谐波磁通大小相等、相位相同。

对于三相变压器组,由于各相磁路是独立的,3 次谐波磁通  $\Phi_3$  可以在各自的铁心内形成闭合磁路,由于铁心的磁阻很小,故此时  $\Phi_3$  较大。 $\Phi_3$  将在绕组中感应出 3 次谐波电动势  $e_3$ ,严重时  $e_3$  的幅值可达基波电动势  $e_1$  幅值的 50% 以上(因为 3 次谐波磁通  $\Phi_3$  的交变频率  $f_3$  是基波磁通  $\Phi_1$  的交变频率  $f_1$  的 3 倍),结果使相电动势  $e_\phi$  的波形成为尖顶波。虽然在三相线电动势  $e_L$  中,3 次谐波电动势互相抵消,使线电动势仍为正弦波,但是相电动势  $e_\phi$  峰值的提高将危害到各相绕组的绝缘,所以三



相变压器组不宜采用 Yy 联结。

**2-8 什么叫标么值?使用标么值来计算变压器问题时有何优点?用标么值表示时,变压器的  $I_0^*$  和  $Z_k^*$  一般在什么范围之内?**

**答** 在工程计算中,各物理量如电压、电流、阻抗、功率等往往不是用它们的实际值进行计算,而是把这些物理量表示成与某一选定的同单位的基值之比的形式,称为标么值(或相对值),即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基值}}$$

标么值在工程计算中应用甚广。标么值是两个同单位物理量的比值,故无量纲。在电机和变压器中,常取各物理量的额定值作为基值。为了区别标么值和实际值,在各物理量原来符号的右上角加上“\*”以表示该物理量的标么值,如电流的标么值用  $I^*$  表示。

采用标么值具有以下优点。

(1) 不论变压器或电机的容量相差多大,用标么值表示的参数及性能数据变化范围很小,这就便于对不同容量的变压器或电机进行比较。例如,对于电力变压器,其空载电流的标么值  $I_0^* \approx 0.05$ ,短路阻抗(又称等效漏阻抗)的标么值  $Z_k^* \approx 0.05$ 。

(2) 采用标么值有下列特点。

① 额定电压、额定电流、额定容量的标么值为 1。

② 在三相系统中,相、线标么值相等。以 Y 联结为例:

$$U_1^* = \frac{U_1}{U_{N1}} = \frac{\sqrt{3}U_\phi}{\sqrt{3}U_{N\phi}} = U_\phi^*$$

③ 用标么值表示时,单相与三相系统的视在功率、有功功率和无功功率的表达式相同,即用标么值计算功率时,无单、三相之分。

④ 归算前后的标么值相等。例如:

$$U_2'^* = \frac{U_2'}{U_{1N}} = \frac{kU_2}{kU_{2N}} = \frac{U_2}{U_{2N}} = U_2^*$$

注意:二次侧归算到一次侧后的物理量的基值应取一次侧的额定值,所以,采用标么值时,一次侧、二次侧各物理量不需要进行归算了。

⑤ 采用标么值时,变压器基本方程的形式不变,并且归算值右上角

标的“'”可以保留,也可以去掉。

由以上特点可知,用标么值表示或进行计算会带来很大方便。

(3) 采用标么值后,某些物理量还具有相同的数值。例如:

$$Z_K^* = \frac{Z_K}{Z_N} = \frac{Z_K}{\frac{U_N}{I_N}} = \frac{I_N Z_K}{U_N} = \frac{U_K}{U_N} = U_K^*$$

即短路阻抗(又称等效漏阻抗) $Z_K$ 的标么值 $Z_K^*$ 等于阻抗电压(又称短路电压) $U_K$ 的标么值 $U_K^*$ 。

变压器空载电流的标么值 $I_0^*$ 约为 $0.02 \sim 0.10$ ;短路阻抗(又称等效漏阻抗)的标么值 $Z_K^*$ 约为 $0.03 \sim 0.10$ 。

**2-9** 什么叫变压器的电压调整率 $\Delta u$ ?它与哪些因素有关? $\Delta u$ 是否能变成负值?

**答** 将变压器一次绕组接在额定电压、额定频率的电网上,当二次绕组空载时,变压器二次绕组的端电压 $U_2$ 为空载电压 $U_{20}$ ,且 $U_{20} = U_{2N}$ 。当二次绕组接上负载以后,由于变压器内部的漏阻抗压降,致使变压器二次绕组的端电压 $U_2$ 与空载电压 $U_{20}$ 不相等。通常用电压调整率(又称电压变化率)来表示副边电压变化的程度。电压调整率是表征变压器运行性能的主要性能指标之一,它反映了变压器供电电压的稳定性。

当变压器一次绕组接在额定电压、额定频率的电网上,负载功率因数为常数时,空载时二次绕组端电压 $U_{20}$ 与负载时二次绕组端电压 $U_2$ 的算术差,用二次侧额定电压的百分数表示的数值,称为变压器的电压调整率,用符号 $\Delta u$ 表示,即

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \\ &= \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \\ &= \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\% \end{aligned}$$

变压器的电压调整率既与负载的大小(即 $I^*$ )和负载的性质(即功率因数角 $\varphi_2$ 的大小和正负)有关,还与变压器的短路阻抗(又称等效漏

阻抗)有关。

当变压器带感性负载时,  $\varphi_2$  为正值,  $\sin\varphi_2$  和  $\cos\varphi_2$  都大于零,  $\Delta u$  为正值, 负载电流越大, 二次绕组端电压越降低; 当变压器带容性负载时,  $\varphi_2$  为负值,  $\cos\varphi_2 > 0$ ,  $\sin\varphi_2 < 0$ , 电压调整率  $\Delta u$  可能为正值, 也可能为负值, 当  $\Delta u$  为负值时, 随着负载电流的增加, 二次绕组端电压不但不下降, 反而增加。

**2-10** 变压器的额定效率  $\eta_N$  与最大效率  $\eta_{\max}$  是否同一? 什么情况下才能达到最大效率?

**答** 变压器的效率是指变压器的输出功率  $P_2$  与输入功率  $P_1$  的百分比, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

额定负载(即负载电流的标么值  $I_2^* = 1$ ) 时, 变压器的效率称为额定效率, 用  $\eta_N$  表示。额定效率  $\eta_N$  是变压器的主要性能指标之一。

对于已做好的变压器, 其空载损耗  $P_0$  和额定负载时的短路损耗是一定的, 所以效率与负载的大小、负载功率因数  $\cos\varphi_2$  有关。在  $\cos\varphi_2 =$  常数下, 效率随负载电流变化的曲线  $\eta = f(I_2^*)$ , 称为效率曲线(又称效率特性)。从效率曲线可以看出, 当负载电流变化到某一数值时, 将出现最大效率  $\eta_{\max}$ 。

当变压器的铜耗  $p_{Cu}$  等于铁耗  $p_{Fe}$  时, 或者说可变损耗等于不变损耗时, 变压器的效率就达到最大值。由于铜耗  $p_{Cu}$  可以通过短路试验确定, 即

$$p_{Cu} \approx P_K = \left( \frac{I_2}{I_{2N}} \right)^2 P_{KN} = I_2^{*2} P_{KN}$$

式中:  $P_K$  为变压器的短路损耗;  $P_{KN}$  为额定短路电流时的短路损耗。

又由于铁耗  $p_{Fe}$  近似等于额定电压下的空载损耗  $P_0$ 。因此, 可得出变压器效率达到最大值的条件为

$$p_{Fe} = p_{Cu}$$

或

$$P_0 = I_2^{*2} P_{KN}$$

即当  $I_2^* = \sqrt{P_0/P_{KN}}$  时,  $\eta = \eta_{\max}$ 。

由以上分析可知,当变压器的负载电流的标么值  $I_2^* = 1$  时,  $\eta = \eta_N$ ; 而当  $I_2^* = \sqrt{P_0/P_{KN}}$  时,  $\eta = \eta_{\max}$ 。因此,变压器的额定效率  $\eta_N$  与最大效率  $\eta_{\max}$  不同,由于电力变压器  $P_0/P_{KN}$  一般取  $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$ ,故最大效率时的负载电流的标么值  $I_2^*$  大体上取在  $0.5 \sim 0.75$ 。

**2-11** 变压器理想并联运行的条件有哪些?如何才能达到这些条件?

答 (1) 变压器理想并联运行的条件如下。

① 空载时,并联的变压器之间无环流。因为环流会增加变压器的损耗,严重时会使变压器过热,甚至烧坏。

② 负载时,各变压器所承担的负载应按其容量的大小成比例分配。这样,容量大的变压器承担的负载电流大,容量小的变压器承担的负载电流小,防止其中某台过载或欠载,使各变压器的容量得到充分利用。

③ 各变压器输出电流同相位。这样,当总的负载电流一定时,各变压器所分担的电流为最小,使总的铜耗为最小。

(2) 要达到上述的理想要求,并联运行的各台变压器应满足以下要求:

- ① 各台变压器的额定电压与变比(又称电压比)要相等;
- ② 各台变压器的联结组号必须相同;
- ③ 各台变压器的短路阻抗的标么值要相等,阻抗角要相同。

**2-12** 试述自耦变压器的优、缺点和应用范围。

答 因为自耦变压器的额定容量(视在功率)可以分成两部分:一部分称为电磁功率(又称感应功率),它是公共绕组和串联绕组之间通过电磁感应关系,从一次侧传递到二次侧的功率,这部分容量与普通双绕组变压器的一样,决定了变压器的主要尺寸和材料消耗,是变压器设计的依据,称为变压器的计算容量;另一部分称为传导功率,它是通过电路的直接联系,从一次侧直接传递给负载的。由于传导功率不需要增加变压器的计算容量,且是双绕组变压器所没有的,所以自耦变压器与普通双绕组变压器相比较,具有以下特点。

(1) 优点。由于自耦变压器的计算容量小于额定容量,所以在同样

的额定容量下,自耦变压器的主要尺寸比普通双绕组变压器小,使用的有效材料(硅钢片和铜线)和结构材料(钢材)都相应地减少,从而降低了成本。有效材料的减少使得铜耗和铁耗也相应减少,故自耦变压器的效率较高。同时,由于主要尺寸缩小,变压器的质量减轻,外形尺寸缩小,有利于变压器的运输和安装。

自耦变压器的变比(又称电压比) $k$ 。越接近于1,传导功率所占比例就越大。上述的优点就越显著。为此,自耦变压器的变比 $k$ 。一般不超过2,若 $k$ 。过大,自耦变压器的优越性就明显降低。

(2) 缺点。由于自耦变压器的短路阻抗的标幺值比双绕组变压器的小,故短路电流较大。

由于自耦变压器一次、二次绕组之间有电的直接联系,当高压边遭受过电压时,会引起低压边严重过电压。

(3) 应用范围。自耦变压器常用于一次和二次电压比较接近的场合,例如,用以联结两个电压相近的电力系统。在工厂和实验室里,自耦变压器常常用做调压器和启动补偿器等。

**2-13** 试画出三绕组变压器的简化等效电路,此等效电路的参数如何测定?

答 三绕组变压器的简化等效电路如图 2-1 所示。

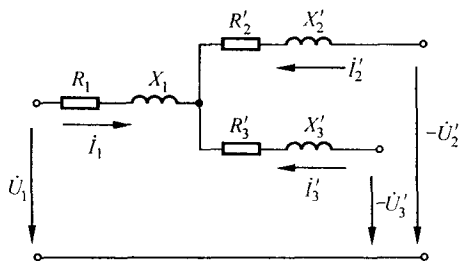


图 2-1 三绕组变压器的简化等效电路

三绕组变压器的简化等效电路中的参数可以通过 3 次短路试验测出。

做第一次短路试验时,绕组 1 加电压,绕组 2 短路,绕组 3 开路,如图 2-2(a) 所示。这时测得的短路阻抗

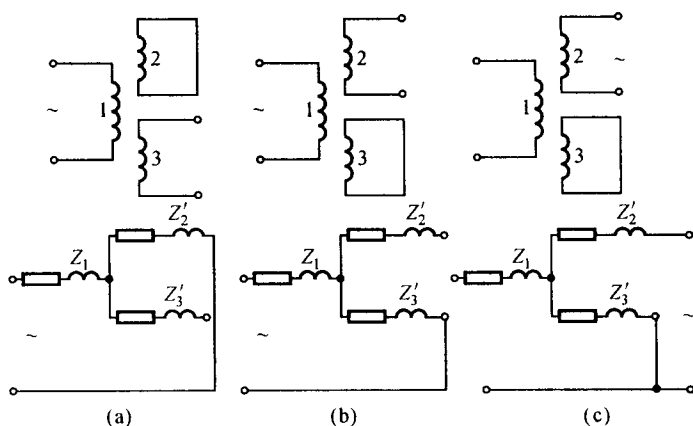


图 2-2 三绕组变压器短路试验

$$Z_{K12} = Z_{1\sigma} + Z'_{2\sigma} = (R_1 + R'_2) + j(X_1 + X'_2) = R_{K12} + jX_{K12}$$

做第二次短路试验时,绕组 1 加电压,绕组 2 开路,绕组 3 短路,如图 2-2(b) 所示。这时测得的短路阻抗

$$Z_{K13} = Z_{1\sigma} + Z'_{3\sigma} = (R_1 + R'_3) + j(X_1 + X'_3) = R_{K13} + jX_{K13}$$

做第三次短路试验时,绕组 1 开路,绕组 2 加电压,绕组 3 短路,如图 2-2(c) 所示。这时测得的短路阻抗  $Z_{K23} = R_{K23} + jX_{K23}$  是折算(又称归算)到绕组 2 的短路阻抗。为了将测出的参数折算到绕组 1,需将所得结果乘以  $k_{12}^2$ 。这样,折算到绕组 1 的短路阻抗

$$Z'_{K23} = Z'_{2\sigma} + Z'_{3\sigma} = (R'_2 + R'_3) + j(X'_2 + X'_3) = R'_{K23} + jX'_{K23}$$

将以上三次短路试验结果中的实数部分和虚数部分分别求解,可以计算出  $Z_{1\sigma}$ 、 $Z'_{2\sigma}$ 、 $Z'_{3\sigma}$  来,已知

$$R_{K12} = R_1 + R'_2, \quad X_{K12} = X_1 + X'_2$$

$$R_{K13} = R_1 + R'_3, \quad X_{K13} = X_1 + X'_3$$

$$R'_{K23} = R'_2 + R'_3, \quad X'_{K23} = X'_2 + X'_3$$

于是

$$R_1 = \frac{1}{2}(R_{K12} + R_{K13} - R'_{K23})$$

$$R'_2 = \frac{1}{2}(R_{K12} + R'_{K23} - R_{K13})$$

$$R'_3 = \frac{1}{2}(R_{K13} + R'_{K23} - R_{K12})$$

$$X_1 = \frac{1}{2}(X_{K12} + X_{K13} - X'_{K23})$$

$$X'_2 = \frac{1}{2}(X_{K12} + X'_{K23} - X_{K13})$$

$$X'_3 = \frac{1}{2}(X_{K13} + X'_{K23} - X_{K12})$$

等效漏电抗  $X_1$ 、 $X'_2$ 、 $X'_3$  的大小与各绕组在铁心上的排列位置有关。在某种特定的布置下,其中某个等效漏电抗可能接近于零,甚至为微小的负值。此时该等效漏电抗可以当作容抗计算。

负电抗是电容性质的,这当然不是变压器绕组真具有电容性。因为等效漏电抗是各种不同电抗的组合,并不表示漏电抗。各绕组之间的漏电抗  $X_{K12}$ 、 $X_{K13}$ 、 $X'_{K23}$  是不会为负的。

**2-14** 有一台三相变压器,额定容量  $S_N = 5000 \text{ kVA}$ ,额定电压  $U_{1N}/U_{2N} = 10 \text{ kV}/6.3 \text{ kV}$ ,Yd 联结。试求:

- (1) 一次、二次侧的额定电流;
- (2) 一次、二次侧的额定相电压和额定相电流。

解 (1) 一次、二次侧的额定电流。

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} \text{ A} = 288.68 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3} \text{ A} = 458.23 \text{ A}$$

- (2) 一次、二次侧的额定相电压和额定相电流。

一次侧为 Y 联结

$$U_{1N\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}}U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 10 \times 10^3 \text{ V} = 5773.7 \text{ V}$$

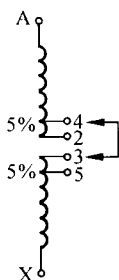
$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 288.68 \text{ A}$$

二次侧为  $\Delta$  联结

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 6300 \text{ V}$$

$$I_{2N\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}}I_{2N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 458.23 \text{ A} = 264.57 \text{ A}$$

**2-15** 一台单相变压器,其一次侧电压为 220 V,频率为 50 Hz,一次绕组  $N_1 = 200$  匝,铁心的有效截面积  $A = 35 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,不计漏磁。试



求:

- (1) 铁心内的主磁通和磁通密度;
- (2) 二次侧要得到 100 V 和 36 V 两种电压时,二次绕组的匝数;
- (3) 如果一次绕组有  $\pm 5\%$  匝数的抽头,如图 2-3 所示,二次绕组的电压是多少?

**解** (1) 铁心内的主磁通  $\Phi_m$  和磁通密度

图 2-3 习题 2-15  $B_m$ 。

的绕组

因为  $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$

$$\text{所以 } \Phi_m = \frac{U_1}{4.44 f N_1} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 200} \text{ Wb} = 49.55 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$B_m = \frac{\Phi_m}{A} = \frac{49.55 \times 10^{-4}}{35 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.416 \text{ T}$$

(2) 二次侧要得到 100 V 和 36 V 两种电压时,二次绕组的匝数  $N_2$  和  $N'_2$ 。

$$\text{因为 } \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\text{所以 } N_2 = \frac{U_2}{U_1} N_1 = \frac{100}{220} \times 200 = 91$$

$$\text{因为 } \frac{U_1}{U'_2} = \frac{N_1}{N'_2}$$

$$\text{所以 } N'_2 = \frac{U'_2}{U_1} N_1 = \frac{36}{220} \times 200 = 33$$

(3) 如果一次绕组有  $\pm 5\%$  匝数的抽头,如图 2-3 所示,二次绕组的电压。

当一次绕组匝数为  $N'_1 = N_1 + 5\% N_1 = 210$  匝时:

$$U_2 = \frac{N_2}{N'_1} U_1 = \frac{91}{210} \times 220 \text{ V} = 95.33 \text{ V}$$

$$U'_2 = \frac{N'_2}{N'_1} U_1 = \frac{33}{210} \times 220 \text{ V} = 34.57 \text{ V}$$



当一次绕组匝数为  $N_1'' = N_1 - 5\%N_1 = 190$  匝时:

$$U_2' = \frac{N_2}{N_1''} U_1 = \frac{91}{190} \times 220 \text{ V} = 105.37 \text{ V}$$

$$U_2'' = \frac{N_2'}{N_1''} U_1 = \frac{33}{190} \times 220 \text{ V} = 38.2 \text{ V}$$

**2-16** 有一台单相变压器, 已知参数为  $R_1 = 2.19 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = 15.4 \Omega$ ,  $R_2 = 0.15 \Omega$ ,  $X_{2\sigma} = 0.964 \Omega$ ,  $R_m = 1250 \Omega$ ,  $X_m = 12600 \Omega$ ,  $N_1/N_2 = 876$  匝/260 匝。当二次电压  $U_2 = 6000 \text{ V}$ , 二次电流  $I_2 = 180 \text{ A}$ , 且  $\cos\varphi_2 = 0.8$  (滞后) 时:

(1) 试画出归算到高压侧的 T 形等效电路;

(2) 用 T 形等效电路和简化等效电路求  $\dot{U}_1$  和  $\dot{I}_1$ , 并比较其结果。

**解** (1) 画出归算到高压侧的 T 形等效电路。

① 将二次绕组的参数  $R_2$  和  $X_{2\sigma}$  归算到一次绕组 (高压侧)

因为 
$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{876}{260} = 3.369$$

所以 
$$R_2' = k^2 R_2 = 3.369^2 \times 0.15 \Omega = 1.703 \Omega$$

$$X_{2\sigma}' = k^2 X_{2\sigma} = 3.369^2 \times 0.964 \Omega = 10.942 \Omega$$

② 归算到高压侧的 T 形等效电路如图 2-4 所示。

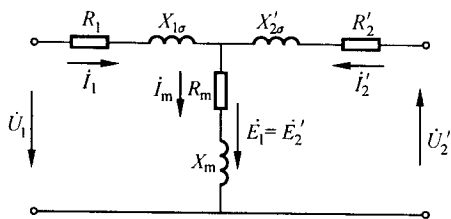


图 2-4 归算到高压侧的 T 形等效电路

(2) 用 T 形等效电路和简化等效电路求  $\dot{U}_1$  和  $\dot{I}_1$ , 并比较其结果。

① 用 T 形等效电路求  $\dot{U}_1$  和  $\dot{I}_1$ 。T 形等效电路及各物理量的参考方向如图 2-4 所示。

$$U_2' = kU_2 = 3.369 \times 6000 \text{ V} = 20214 \text{ V}$$

$$I'_2 = \frac{1}{k} I_2 = \frac{1}{3.369} \times 180 \text{ A} = 53.428 \text{ A}$$

$$Z'_{2s} = R'_2 + jX'_{2s} = (1.703 + j10.942) \Omega = 11.074 \angle 81.15^\circ \Omega$$

以  $\dot{U}'_2$  为参考相量, 即取  $\dot{U}'_2 = U'_2 \angle 0^\circ$ 。

因为  $\dot{U}'_2 = U'_2 \angle 0^\circ = 20214 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 而且已知  $\cos \varphi_2 = 0.8$  (滞后)

所以  $\dot{I}'_2 = I'_2 \angle -\varphi_2 = 53.428 \angle -36.87^\circ \text{ A}$

$$= (42.742 - j32.057) \text{ A}$$

其中  $\varphi_2$  为  $I'_2$  滞后  $\dot{U}'_2$  的相位角, 这里  $\varphi_2 = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_{2s}$$

$$= (20214 \angle 0^\circ + 53.428 \angle -36.87^\circ \times 11.074 \angle 81.15^\circ) \text{ V}$$

$$= (20214 \angle 0^\circ + 591.662 \angle 44.28^\circ) \text{ V}$$

$$= (20214 + 423.592 + j413.078) \text{ V}$$

$$= (20637.592 + j413.078) \text{ V}$$

$$= 20641.726 \angle 1.147^\circ \text{ V}$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = (20637.592 + j413.078) \text{ V} = 20641.726 \angle 1.147^\circ \text{ V}$$

$$Z_m = R_m + jX_m = (1250 + j12600) \Omega = 12661.85 \angle 84.334^\circ \Omega$$

$$\dot{I}_m = -\frac{\dot{E}_1}{Z_m} = -\frac{\dot{E}'_2}{Z_m} = -\frac{20641.726 \angle 1.147^\circ}{12661.85 \angle 84.334^\circ} \text{ A}$$

$$= -1.6302 \angle -83.187^\circ \text{ A} = (-0.1934 + j1.6187) \text{ A}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m - \dot{I}'_2 = [-0.1934 + j1.6187 - (42.742 - j32.057)] \text{ A}$$

$$= (-42.9354 + j33.6757) \text{ A} = 54.567 \angle 141.89^\circ \text{ A}$$

$$= -54.567 \angle -38.11^\circ \text{ A}$$

$$Z_{1s} = R_1 + jX_{1s} = (2.19 + j15.4) \Omega = 15.555 \angle 81.906^\circ \Omega$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_{1s}$$

$$= (-20641.726 \angle 1.147^\circ + 54.567 \angle 141.89^\circ \times 15.555 \angle 81.906^\circ) \text{ V}$$

$$= (-20641.726 \angle 1.147^\circ + 848.79 \angle 223.796^\circ) \text{ V}$$

$$= [-(20637.592 + j413.078) + (-612.664 - j587.441)] \text{ V}$$

$$= (-21250.256 - j1000.519) \text{ V}$$

$$= 21273.8 \angle 182.7^\circ \text{ V}$$

$$= -21273.8 \angle 2.7^\circ \text{ V}$$

若以  $-\dot{U}'_2$  为参考相量, 即取  $-\dot{U}'_2 = U'_2 \angle 0^\circ$ , 则  $\dot{I}_1 = 54.567 \angle -38.11^\circ$  A,  $\dot{U}_1 = 21273.8 \angle 2.7^\circ$  V。

② 用简化等效电路求  $\dot{U}_1$  和  $\dot{I}_1$ 。简化等效电路及各物理量的参考方向如图 2-5 所示。

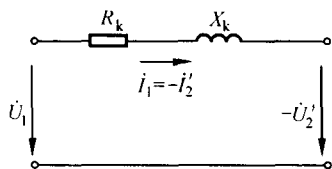


图 2-5 变压器的简化等效电路

图 2-5 中的短路参数如下：

$$R_K = R_1 + R'_2 = (2.19 + 1.703) \Omega = 3.893 \Omega$$

$$X_K = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = (15.4 + 10.942) \Omega = 26.342 \Omega$$

$$Z_K = R_K + jX_K = (3.893 + j26.342) \Omega = 26.628 \angle 81.59^\circ \Omega$$

以  $\dot{U}'_2$  为参考相量, 即取  $\dot{U}'_2 = U_2 \angle 0^\circ = 20214 \angle 0^\circ$  V, 则

$$\dot{I}'_2 = I'_2 \angle -\varphi_2 = 53.428 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

由简化等效电路图可知

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = -53.428 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

$$= (-42.742 + j32.057) \text{ A}$$

$$= 53.428 \angle 143.13^\circ \text{ A}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_K + (-\dot{U}'_2)$$

$$= (53.428 \angle 143.13^\circ \times 26.628 \angle 81.59^\circ - 20214 \angle 0^\circ) \text{ V}$$

$$= (1422.68 \angle 224.72^\circ - 20214 \angle 0^\circ) \text{ V}$$

$$= (-1010.89 - j1001.06 - 20214) \text{ V}$$

$$= (-21224.89 - j1001.06) \text{ V}$$

$$= 21248.48 \angle 182.7^\circ \text{ V} = -21248.48 \angle 2.7^\circ \text{ V}$$

若以  $-\dot{U}'_2$  为参考相量, 即取  $-\dot{U}'_2 = U_2 \angle 0^\circ$ , 则  $\dot{I}_1 = 53.428 \angle -36.87^\circ$  A,  $\dot{U}_1 = 21248.48 \angle 2.7^\circ$  V。

采用简化等效电路的计算结果与采用 T 形等效电路的计算结果近似相等。

**2-17** 在图 2-6 中, 各铅垂线上对应的高、低压绕组绕于同一铁心柱上, 已知 A、B、C 为正相序, 试判断联结组 a 和 b 的组号。

**解** (1) 联结组 a 的组号(又称组别或标号)。如图 2-6(a) 所示为

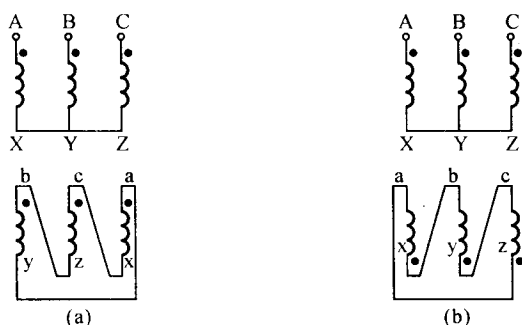


图 2-6 习题 2-17 的绕组

(a) 联结组 a; (b) 联结组 b

Yd 联结组的绕组接线图, 首先根据一次绕组的联结方式, 画出一一次绕组的电压相量图, 由于一次绕组为星形联结, 所以一次绕组的电压相量图如图 2-7(a) 所示(注意把一次侧线电压三角形的一条中线 OA 作为时钟的长针, 指向钟面的 12。还应注意一次绕组的相电压相量  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  应为顺时针方向)。

由于一、二次绕组的首端为同名端, 故一、二次绕组对应的相电压相量应为同相位。因为 b 相与 A 相绕于同一铁心柱, 所以  $\dot{U}_b$  与  $\dot{U}_A$  同相位。同理,  $\dot{U}_c$  与  $\dot{U}_B$  同相位,  $\dot{U}_a$  与  $\dot{U}_C$  同相位, 如图 2-7(a) 所示。然后根据二次绕组的联结方式, 画出二次绕组的电压相量图。由于二次绕组为  $\Delta$  联结, 且 a 与 y 相联, b 与 z 相联, c 与 x 相联, 所以二次绕组的电压相量图如图 2-7(b) 所示(注意画二次绕组的电压相量图时, 应将  $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$  按图 2-7(a) 中所示方向平移到图 2-7(b))。

最后, 将二次绕组的电压相量图平移, 使其线电压三角形的重心 o 与一次侧线电压三角形的重心 O 重合, 如图 2-7(c) 所示。由于二次侧线电压三角形中对应的中线 oa 为时钟的短针, 所以, oa 所指的钟点 7, 就是该联结组的组号, 记为 Yd7。

(2) 联结组 b 的组号。如图 2-6(b) 所示为 Yd 联结组的绕组接线图。由于一次绕组为 Y 联结, 所以一次绕组的电压相量图如图 2-8(a) 所示。

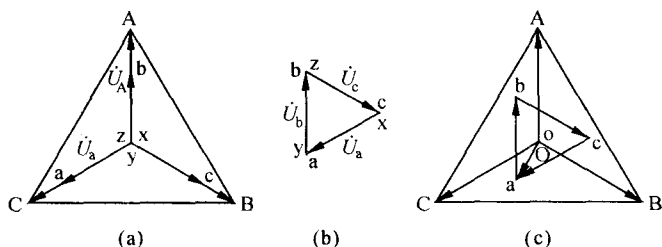


图 2-7 联结组 a 的电压相量图

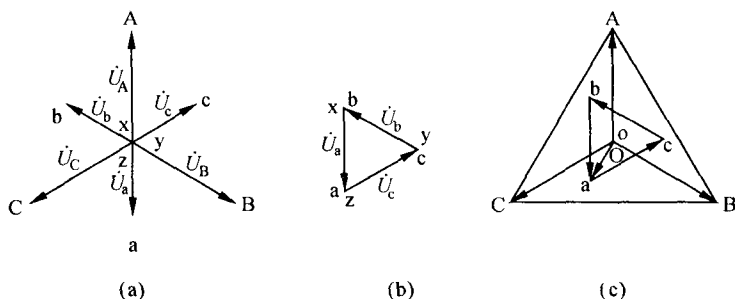


图 2-8 联结组 b 的电压相量图

由于一、二次绕组的首端为非同名端,故一、二次绕组对应的相电压相量应相位相反。因为 a 相与 A 相绕于同一铁心柱,所以  $\dot{U}_a$  与  $\dot{U}_A$  相位相反,同理,  $\dot{U}_b$  与  $\dot{U}_B$  相位相反,  $\dot{U}_c$  与  $\dot{U}_C$  相位相反,如图 2-8(a) 所示。因为二次绕组为  $\triangle$  联结,且 a 与 z 相联, b 与 x 相联, c 与 y 相联,所以二次绕组的电压相量图如图 2-8(b) 所示。

最后,将二次绕组的电压相量图平移,使其线电压三角形的重心 o 与一次侧线电压三角形的重心 O 重合,如图 2-8(c) 所示。由于 oa 所指的钟点为 7,所以该联结组的组号为 7,记作 Yd7。

**2-18** 变压器在额定电压下进行开路试验,和在额定电流下进行短路试验时,电压加在高压侧所测得的  $P_0$  和  $P_K$  与电压加在低压侧所测得的结果是否一样?

**解** 以单相降压变压器为例,变比  $k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$ 。

(1) 电压加在高压侧(即一次侧)。

① 在额定电压  $U_{1N}$  下进行开路试验(又称空载试验)时,由于空载电流  $I_{10}$  很小,它在一次绕组中产生的电阻损耗可以忽略不计,故空载损耗

$$P_{10} = I_{10}^2 R_m$$

② 在额定电流  $I_{1N}$  下进行短路试验(即  $I_{1K} = I_{1N}$ )时,由于外加电压很低,主磁通很小,铁耗和励磁电流均可忽略不计,故短路损耗

$$P_{1K} = I_{1K}^2 R_K = I_{1N}^2 R_K$$

(2) 电压加在低压侧(即二次侧)。

① 在额定电压  $U_{2N}$  下进行开路试验时,由于空载电流  $I_{20}$  很小,它在二次绕组中产生的电阻损耗可以忽略不计,故空载损耗

$$P_{20} = I_{20}^2 R'_m = \left(\frac{I_{20}}{k}\right)^2 (k^2 R'_m) = I_{20}'^2 R_m \approx I_{10}^2 R_m = P_{10}$$

式中:  $R'_m$  为将变压器励磁电阻  $R_m$  归算(折算)到变压器二次侧时的归算值。

② 在额定电流  $I_{2N}$  下进行短路试验(即  $I_{2K} = I_{2N}$ )时,由于外加电压很低,主磁通很小,铁耗和励磁电流均可忽略不计,故短路损耗

$$\begin{aligned} P_{2K} &= I_{2K}^2 R'_K = I_{2N}^2 R'_K = \left(\frac{I_{2N}}{k}\right)^2 (k^2 R'_K) = I_{2N}'^2 R_K \\ &\approx I_{1N}^2 R_K = I_{1K}^2 R_K = P_{1K} \end{aligned}$$

式中:  $R'_K$  为将变压器短路电阻  $R_K$  归算到变压器二次侧时的归算值。

由以上分析可知,电压加在高压侧所测得的  $P_0$  和  $P_K$  与电压加在低压侧所测得的结果一样。

**2-19** 有一台 1000 kVA、10 kV/6.3 kV 的单相变压器,额定电压下的空载损耗为 4900 W,空载电流标幺值为 0.05,额定电流下 75 °C 时的短路损耗为 14000 W,短路电压百分值为 5.2%。设归算后一次和二次绕组的电阻相等,漏电抗亦相等,试计算:

(1) 归算到一次侧时 T 形等效电路的参数;

(2) 用标幺值表示时,近似等效电路的参数;

(3) 负载功率因数为 0.8(滞后)时,变压器的额定电压调整率和额定效率;

(4) 变压器的最大效率,发生最大效率时负载的大小( $\cos\varphi_2 = 0.8$ )。

解 (1) 归算到一次侧时 T 形等效电路的参数。

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{10 \times 10^3}{6.3 \times 10^3} = 1.5873$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{1000 \times 10^3}{10 \times 10^3} \text{ A} = 100 \text{ A}$$

因为电压加在一次侧所测得的  $P_0$  和  $P_K$  与电压加在二次侧所测得的结果相同(见习题 2-18),而且归算(折算)前后各物理量和参数的标幺值相同。所以可将试验测得的数据换算到一次侧,从而可以直接得到归算到一次侧时的参数。

$$\text{因为} \quad I_{10}^* = 0.05$$

$$\text{所以} \quad I_{10} = I_{10}^* I_{1N} = 0.05 \times 100 \text{ A} = 5 \text{ A}$$

$$\text{因为} \quad u_K = 5.2\%$$

$$\text{所以} \quad U_{1K} = u_K U_{1N} = 5.2\% \times 10 \times 10^3 \text{ V} = 520 \text{ V}$$

① 励磁参数。

$$Z_m = \frac{U_{1N}}{I_{10}} = \frac{10 \times 10^3}{5} \Omega = 2000 \Omega$$

$$R_m = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} = \frac{4900}{5^2} \Omega = 196 \Omega$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{2000^2 - 196^2} \Omega = 1990.4 \Omega$$

② 短路参数。

$$Z_{K(75^\circ\text{C})} = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} = \frac{U_{1K}}{I_{1N}} = \frac{520}{100} \Omega = 5.2 \Omega$$

$$R_{K(75^\circ\text{C})} = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2} = \frac{P_{1K}}{I_{1N}^2} = \frac{14000}{100^2} \Omega = 1.4 \Omega$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{5.2^2 - 1.4^2} \Omega = 5.0 \Omega$$

$$R_{1(75^\circ\text{C})} = R'_{2(75^\circ\text{C})} = \frac{1}{2} R_{K(75^\circ\text{C})} = \frac{1}{2} \times 1.4 \Omega = 0.7 \Omega$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{1}{2} X_K = \frac{1}{2} \times 5.0 \Omega = 2.5 \Omega$$

(2) 用标幺值表示时,近似等效电路的参数。

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{10 \times 10^3}{100} \Omega = 100 \Omega$$

$$R_m^* = \frac{R_m}{Z_{1N}} = \frac{196}{100} = 1.96$$

$$X_m^* = \frac{X_m}{Z_{1N}} = \frac{1990.4}{100} = 19.9$$

$$R_K^* = \frac{R_K}{Z_{1N}} = \frac{1.4}{100} = 0.014$$

$$X_K^* = \frac{X_K}{Z_{1N}} = \frac{5.0}{100} = 0.05$$

(3) 负载功率因数为 0.8(滞后) 时, 变压器的额定电压调整率和额定效率。

当  $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时,  $\sin\varphi_2 = 0.6$ , 则

$$\begin{aligned}\Delta u_N &= I_{1N}^* (R_K^* \cos\varphi_2 + X_K^* \sin\varphi_2) \times 100\% \\ &= 1.0 \times (0.014 \times 0.8 + 0.05 \times 0.6) \times 100\% \\ &= 4.12\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_N &= 1 - \frac{P_0 + I_{2N}^{*2} P_{KN}}{S_N I_{2N}^* \cos\varphi_2 + P_0 + I_{2N}^{*2} P_{KN}} \\ &= 1 - \frac{4900 + 1.0^2 \times 14000}{1000 \times 10^3 \times 1.0 \times 0.8 + 4900 + 1.0^2 \times 14000} \\ &= 97.69\%\end{aligned}$$

(4) 变压器的最大效率, 发生最大效率时负载的大小 ( $\cos\varphi_2 = 0.8$ )。发生最大效率  $\eta_{\max}$  时, 负载电流的标么值

$$I_2^* = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KN}}} = \sqrt{\frac{4900}{14000}} = 0.5916$$

最大效率

$$\begin{aligned}\eta_{\max} &= 1 - \frac{P_0 + I_2^{*2} P_{KN}}{S_N I_2^* \cos\varphi_2 + P_0 + I_2^{*2} P_{KN}} \\ &= 1 - \frac{4900 + 0.5916^2 \times 14000}{1000 \times 10^3 \times 0.5916 \times 0.8 + 4900 + 0.5916^2 \times 14000} \\ &= 97.97\%\end{aligned}$$



2-20 有一台三相变压器,  $S_N = 5600 \text{ kVA}$ ,  $U_{1N}/U_{2N} = 10 \text{ kV}/6.3 \text{ kV}$ , 组号为 Yd11。变压器的开路及短路试验数据如下表所示。

试验名称	线电压 / V	线电流 / A	三相功率 / W	备 注
开路试验	6300	7.4	6800	电压加在低压侧
短路试验	550	323	18000	电压加在高压侧

试求一次侧加额定电压时:

- (1) 归算到一次侧时近似等效电路的参数(实际值和标么值);
- (2) 满载且  $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时, 二次电压  $\dot{U}_2$  和一次电流  $\dot{I}_1$ ;
- (3) 满载且  $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时的额定电压调整率和额定效率。

解 (1) 归算到一次侧时近似等效电路的参数。

因为一次绕组为 Y 联结

$$U_{1N\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 10 \times 10^3 \text{ V} \approx 5.77 \times 10^3 \text{ V}$$

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{5600 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} \text{ A} = 323.3 \text{ A}$$

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}} = \frac{5.77 \times 10^3}{323.3} \Omega = 17.85 \Omega$$

因为二次侧为  $\Delta$  联结

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 6.3 \times 10^3 \text{ V}$$

$$k = \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}} = \frac{5.77 \times 10^3}{6.3 \times 10^3} = 0.916$$

① 励磁参数。

因为开路试验在低压侧(二次侧)进行, 而低压侧为  $\Delta$  联结, 则有

$$U_{20\phi} = U_{20} = 6300 \text{ V}$$

$$I_{20\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{20} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 7.4 \text{ A} = 4.273 \text{ A}$$

$$P_{20\phi} = \frac{1}{3} P_{20} = \frac{1}{3} \times 6800 \text{ W} = 2266.67 \text{ W}$$

从二次侧测得的励磁参数

$$Z_m'' = \frac{U_{20\phi}}{I_{20\phi}} = \frac{6300}{4.273} \Omega = 1474.37 \Omega$$

$$R_m'' = \frac{P_{20\phi}}{I_{20\phi}^2} = \frac{2266.67}{4.273^2} \Omega = 124.14 \Omega$$

归算到一次侧的励磁参数

$$Z_m = k^2 Z_m'' = 0.916^2 \times 1474.37 \Omega = 1237.1 \Omega$$

$$R_m = k^2 R_m'' = 0.916^2 \times 124.14 \Omega = 104.16 \Omega$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{1237.1^2 - 104.16^2} \Omega = 1232.7 \Omega$$

励磁参数的标么值

$$Z_m^* = \frac{Z_m}{Z_{1N}} = \frac{1237.1}{17.85} = 69.31$$

$$R_m^* = \frac{R_m}{Z_{1N}} = \frac{104.16}{17.85} = 5.835$$

$$X_m^* = \frac{X_m}{Z_{1N}} = \frac{1232.7}{17.85} = 69.06$$

$$Z_m^* = R_m^* + jX_m^* = 5.835 + j69.06 = 69.31 \angle 85.17^\circ$$

② 短路参数。

因为短路试验在高压侧(一次侧)进行,而高压侧为 Y 联结,则

$$U_{1K\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1K} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 550 \text{ V} = 317.55 \text{ V}$$

$$I_{1K\phi} = I_{1K} = 323 \text{ A}$$

$$P_{1K\phi} = \frac{1}{3} P_{1K} = \frac{1}{3} \times 18000 \text{ W} = 6000 \text{ W}$$

从一次侧测得的短路参数

$$Z_K = \frac{U_{1K\phi}}{I_{1K\phi}} = \frac{317.55}{323} \Omega = 0.9831 \Omega$$

$$R_K = \frac{P_{1K\phi}}{I_{1K\phi}^2} = \frac{6000}{323^2} \Omega = 0.0575 \Omega$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{0.9831^2 - 0.0575^2} \Omega = 0.981 \Omega$$

短路参数的标么值

$$Z_K^* = \frac{Z_K}{Z_{1N}} = \frac{0.9831}{17.85} = 0.0551$$

$$R_k^* = \frac{R_k}{Z_{1N}} = \frac{0.0575}{17.85} = 0.00322$$

$$X_k^* = \frac{X_k}{Z_{1N}} = \frac{0.981}{17.85} = 0.055$$

$$Z_k^* = R_k^* + jX_k^* = 0.00322 + j0.055 = 0.0551 \angle 86.64^\circ$$

(2) 满载且  $\cos\varphi_2 = 0.8$  (滞后) 时, 二次电压  $\dot{U}_2$  和一次电流  $\dot{I}_1$ 。

变压器的近似等效电路及各物理量的参考方向, 如图 2-9 所示, 电压平衡方程式为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 - (-\dot{U}_2^*) &= -\dot{I}_2^* (R_k^* + jX_k^*) \\ &= -\dot{I}_2^* Z_k^*\end{aligned}$$

一个方程有三个未知量, 虽是互相关联, 但若参考量选择不当, 则求解较难。分析  $\dot{U}_1^*$ 、 $\dot{U}_2^*$ 、 $\dot{I}_2^*$ , 其中只有  $\dot{U}_2^*$  的大小和相位都是待求量, 因此宜选  $-\dot{U}_2^*$  为参考量。这里取

$$-\dot{U}_2^* = \dot{U}_2^* \angle 0^\circ$$

因为满载且  $\cos\varphi_2 = 0.8$  (滞后)

$$-\dot{I}_2^* = \dot{I}_2^* \angle -\varphi_2 = 1.0 \angle -36.87^\circ$$

其中  $\varphi_2$  为  $\dot{I}_2^*$  滞后  $\dot{U}_2^*$  的相位角, 这里  $\varphi_2 = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$ 。

设  $\dot{U}_1$  与  $-\dot{U}_2$  之间的相位差为  $\theta$ , 又已知  $U_1 = U_{1N}$ , 可得

$$\dot{U}_1^* = U_1^* \angle \theta = 1.0 \angle \theta$$

将这些关系式代入原式

$$\dot{U}_1^* - (-\dot{U}_2^*) = \dot{I}_2^* Z_k^*$$

$$U_1^* \angle \theta - U_2^* \angle 0^\circ = \dot{I}_2^* \angle \varphi_2 \times Z_k^* \angle \varphi$$

$$1.0 \angle \theta - U_2^* \angle 0^\circ = 1.0 \angle -36.87^\circ \times 0.0551 \angle 86.64^\circ$$

$$\cos\theta + j\sin\theta - U_2^* = 0.551 \angle 49.77^\circ$$

$$(\cos\theta - U_2^*) + j\sin\theta = 0.03559 + j0.04207$$

等式两边虚数、实数分别相等

$$\sin\theta = 0.04207$$

所以

$$\theta = \arcsin 0.04207 = 2.411^\circ$$

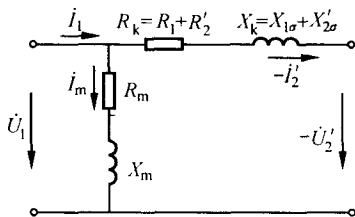


图 2-9 变压器的近似等效电路

$$\cos\theta = \cos 2.411^\circ = 0.9991$$

$$\text{因为} \quad \cos\theta - U_2^* = 0.03559$$

$$\text{所以} \quad U_2^* = \cos\theta - 0.03559 = 0.9991 - 0.03559 = 0.9635$$

$$U_2 = U_2^* U_{2N} = 0.9635 \times 6.3 \times 10^3 \text{ V} = 6070.1 \text{ V}$$

$$\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ = 6070.1 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\text{因为} \quad \theta = 2.411^\circ$$

$$\text{所以} \quad \dot{U}_1^* = U_1^* \angle \theta = 1.0 \angle 2.411^\circ$$

$$\dot{I}_m^* = \frac{\dot{U}_1^*}{Z_m^*} = \frac{1.0 \angle 2.411^\circ}{69.31 \angle 85.17^\circ} = 0.01443 \angle -82.759^\circ$$

$$= 0.001818 - j0.01432$$

$$\dot{I}_1^* = \dot{I}_m^* + (-\dot{I}_2^*) = (0.01443 \angle -82.759^\circ + 1.0 \angle -36.87^\circ)$$

$$= 0.001818 - j0.01432 + 0.8 - j0.6$$

$$= 0.801818 - j0.61432$$

$$= 1.0101 \angle -37.46^\circ$$

$$I_1 = I_1^* I_{1N} = 1.0101 \times 323.33 \text{ A} = 326.6 \text{ A}$$

(3) 满载且  $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时的额定电压调整率和额定效率。

$$\begin{aligned} \Delta u_N &= I^* (R_K^* \cos\varphi_2 + X_K^* \sin\varphi_2) \times 100\% \\ &= 1.0 \times (0.00322 \times 0.8 + 0.055 \times 0.6) \times 100\% \\ &= 3.56\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_N &= \left( 1 - \frac{P_0 + I_2^{*2} P_{KN}}{S_N I_2^* \cos\varphi_2 + P_0 + I_2^{*2} P_{KN}} \right) \times 100\% \\ &= \left( 1 - \frac{6800 + 1.0^2 \times 18000}{5600 \times 10^3 \times 1.0 \times 0.8 + 6800 + 1.0^2 \times 18000} \right) \times 100\% \\ &= 99.45\% \end{aligned}$$

**2-21** 有一台 5600 kVA、Yd11 联结, 35 kV/6.6 kV 的三相变压器, 从短路试验测得  $X_K^* = 5.25\%$ 、 $R_K^* = 1\%$ 。当  $U_1 = U_{1N}$  时, 在低压侧加额定负载  $I_2 = I_{2N}$ , 测得端电压恰好等于额定值  $U_2 = U_{2N}$ , 试求此时负载的功率因数角  $\varphi_2$  及负载性质。

**解** 因为当  $U_1 = U_{1N}$ 、 $I_2 = I_{2N}$  时,  $U_2 = U_{2N}$

$$\text{所以 } \Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N\downarrow}} \times 100\% = \frac{U_{2N\downarrow} - U_{2N\downarrow}}{U_{2N\downarrow}} \times 100\% = 0$$

$$\begin{aligned} \text{因为 } \Delta u &= I^* (R_K^* \cos \varphi_2 + X_K^* \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= 1.0 \times (R_K^* \cos \varphi_2 + X_K^* \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{所以 } R_K^* \cos \varphi_2 + X_K^* \sin \varphi_2 = 0$$

$$X_K^* \sin \varphi_2 = -R_K^* \cos \varphi_2$$

$$\text{整理得 } \tan \varphi_2 = \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} = -\frac{R_K^*}{X_K^*} = -\frac{0.01}{0.0525} = -0.1905$$

$$\varphi_2 = \arctan(-0.1905) = -10.79^\circ$$

$\varphi_2 < 0$ , 负载性质为容性。

**2-22** 两台 Yd11 联结的三相变压器并联运行, 已知数据为

第一台: 5600 kVA, 6000 V/3050 V,  $Z_{K1}^* = 0.05$

第二台: 3200 kVA, 6000 V/3000 V,  $Z_{K2}^* = 0.055$

若不计算短路阻抗角的差别, 试求两台变压器二次和一次侧的空载环流(实际值)。

**解** 因为两台变压器一次侧均为 Y 联结

$$U_{1N\downarrow I} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1NI} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 6000 \text{ V} = 3464.203 \text{ V}$$

$$I_{1NI} = \frac{S_{NI}}{\sqrt{3} U_{1NI}} = \frac{5600 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} \text{ A} = 538.876 \text{ A}$$

$$I_{1N\downarrow I} = I_{1NI} = 538.876 \text{ A}$$

$$U_{1N\downarrow II} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1NII} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 6000 \text{ V} = 3464.203 \text{ V}$$

$$I_{1NII} = \frac{S_{NII}}{\sqrt{3} U_{1NII}} = \frac{3200 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} \text{ A} = 307.929 \text{ A}$$

$$I_{1N\downarrow II} = I_{1NII} = 307.929 \text{ A}$$

因为两台变压器二次侧均为  $\Delta$  联结

$$U_{2N\downarrow I} = U_{2NI} = 3050 \text{ V}$$

$$I_{2NI} = \frac{S_{NI}}{\sqrt{3}U_{2NI}} = \frac{5600 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 3050} \text{ A} = 1060.084 \text{ A}$$

$$I_{2N\Phi I} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{2NI} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1060.084 \text{ A} = 612.058 \text{ A}$$

$$U_{2N\Phi II} = U_{2NII} = 3000 \text{ V}$$

$$I_{2NII} = \frac{S_{NII}}{\sqrt{3}U_{2NII}} = \frac{3200 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 3000} \text{ A} = 615.858 \text{ A}$$

$$I_{2N\Phi II} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{2NII} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 615.858 \text{ A} = 355.576 \text{ A}$$

$$\text{因为 } Z_{2NI} = \frac{U_{2N\Phi I}}{I_{2N\Phi I}} = \frac{3050}{612.058} \Omega = 4.983 \Omega$$

所以归算到变压器二次侧的短路阻抗

$$Z'_{KI} = Z_{KI}^* \times Z_{2NI} = 0.05 \times 4.983 \Omega = 0.2492 \Omega$$

$$\text{因为 } Z_{2NII} = \frac{U_{2N\Phi II}}{I_{2N\Phi II}} = \frac{3000}{355.576} \Omega = 8.437 \Omega$$

所以归算到变压器二次侧的短路阻抗

$$Z'_{KII} = Z_{KII}^* \times Z_{2NII} = 0.055 \times 8.437 \Omega = 0.4640 \Omega$$

(1) 两台变压器二次侧的环流。

$$k_I = \frac{U_{1N\Phi I}}{U_{2N\Phi I}} = \frac{3464.203}{3050} = 1.1358$$

$$k_{II} = \frac{U_{1N\Phi II}}{U_{2N\Phi II}} = \frac{3464.203}{3000} = 1.1547$$

$$\begin{aligned} I_{2c\Phi} &= \frac{U_{1N\Phi} \left( \frac{1}{k_I} - \frac{1}{k_{II}} \right)}{Z'_{KI} + Z'_{KII}} \\ &= \frac{3464.203 \times \left( \frac{1}{1.1358} - \frac{1}{1.1547} \right)}{0.2492 + 0.4640} \text{ A} \\ &= \frac{49.922}{0.7132} \text{ A} = 70.0 \text{ A} \end{aligned}$$

(2) 两台变压器一次侧的环流。

$$I_{1c\text{I}} = \frac{1}{k_{\text{I}}} \times I_{2c\text{I}} = \frac{1}{1.1358} \times 70.0 \text{ A} = 61.63 \text{ A}$$

$$I_{1c\text{II}} = \frac{1}{k_{\text{II}}} \times I_{2c\text{II}} = \frac{1}{1.1547} \times 70.0 \text{ A} = 60.62 \text{ A}$$

2-23 某变电所有两台组号为 Yyn0 的三相变压器并联运行,其数据为

第一台:  $S_{\text{NI}} = 180 \text{ kVA}$ ,  $U_{\text{IN}}/U_{\text{ZN}} = 6.3 \text{ kV}/0.4 \text{ kV}$ ,  $Z_{\text{KI}}^* = 0.07$

第二台:  $S_{\text{NII}} = 320 \text{ kVA}$ ,  $U_{\text{IN}}/U_{\text{ZN}} = 6.3 \text{ kV}/0.4 \text{ kV}$ ,  $Z_{\text{KII}}^* = 0.065$

试计算:

(1) 当总负载为 400 kVA 时,每台变压器分担多少负载?

(2) 在每台变压器均不过载的情况下,并联组的最大输出是多少?

解 (1) 当总负载为 400 kVA 时,每台变压器分担的负载。

因为两台变压器的额定电压和负载电压均相等,则

$$\frac{S_{\text{I}}^*}{S_{\text{II}}^*} = \frac{I_{\text{I}}^*}{I_{\text{II}}^*} = \frac{Z_{\text{KII}}^*}{Z_{\text{KI}}^*} = \frac{0.065}{0.07}$$

因为总负载为 400 kVA,则

$$S_{\text{I}}^* S_{\text{NI}} + S_{\text{II}}^* S_{\text{NII}} = 400 \text{ kVA}$$

即

$$180S_{\text{I}}^* + 320S_{\text{II}}^* = 400$$

将以上两式联立求解,得  $S_{\text{I}}^* = 0.762$ ,  $S_{\text{II}}^* = 0.821$ 。

所以  $S_{\text{I}} = S_{\text{I}}^* S_{\text{NI}} = 0.762 \times 180 \text{ kVA} = 137 \text{ kVA}$

$$S_{\text{II}} = S_{\text{II}}^* S_{\text{NII}} = 0.821 \times 320 \text{ kVA} = 263 \text{ kVA}$$

(2) 每台变压器均不过载的情况下,并联组的最大输出。

因为短路阻抗标么值小的变压器首先达到满载,所以取  $I_{\text{II}}^* = 1.0$ 。

$$\text{因此 } I_{\text{I}}^* = I_{\text{II}}^* \frac{Z_{\text{KII}}^*}{Z_{\text{KI}}^*} = 1.0 \times \frac{0.065}{0.07} = 0.9286$$

$$S_{\text{II}} = I_{\text{II}}^* S_{\text{NII}} = 1.0 \times 320 \text{ kVA} = 320 \text{ kVA}$$

$$S_{\text{I}} = I_{\text{I}}^* S_{\text{NI}} = 0.9286 \times 180 \text{ kVA} = 167.1 \text{ kVA}$$

$$S_{\text{总}} = S_{\text{I}} + S_{\text{II}} = (320 + 167.1) \text{ kVA} = 487.1 \text{ kVA}$$

2-24 一台三绕组变压器,额定电压为 110 kV/38.5 kV/11 kV, YNyn0d11 联结,额定容量为 10000 kVA/10000 kVA/10000 kVA,短路试验数据如下表所示(短路电流为额定电流)。

电压加于绕组	短路损耗 $P_K/\text{kW}$	短路电压百分值 $u_K/(\%)$
高—中	111.2	16.95
高—低	148.7	10.1
中—低	82.7	6.06

试画出归算到高压侧的简化等效电路,并标出其参数值。

解 三绕组变压器的简化等效电路如图 2-1 所示。

因为高压侧为 Y 联结

$$\text{所以} \quad U_{1N\Phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 110 \text{ kV} = 63.51 \text{ kV}$$

$$I_{1N} = \frac{S_{1N}}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{10000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 110 \times 10^3} \text{ A} = 52.488 \text{ A}$$

$$I_{1N\Phi} = I_{1N} = 52.488 \text{ A}$$

因为中压侧为 Y 联结

$$\text{所以} \quad U_{2N\Phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{2N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 38.5 \text{ kV} = 22.229 \text{ kV}$$

$$I_{2N} = \frac{S_{2N}}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{10000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 38.5 \times 10^3} \text{ A} = 149.966 \text{ A}$$

$$I_{2N\Phi} = I_{2N} = 149.966 \text{ A}$$

因为低压侧为  $\Delta$  联结

$$\text{所以} \quad U_{3N\Phi} = U_{3N} = 11 \text{ kV}$$

$$I_{3N} = \frac{S_{3N}}{\sqrt{3} U_{3N}} = \frac{10000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 11 \times 10^3} \text{ A} = 524.88 \text{ A}$$

$$I_{3N\Phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{3N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 524.88 \text{ A} = 303.048 \text{ A}$$

(1) 电压加于高压绕组,中压绕组短路,低压绕组开路。

$$P_{12K\Phi} = \frac{1}{3} P_{12K} = \frac{1}{3} \times 111.2 \text{ kW} = 37.067 \text{ kW}$$

$$U_{12K\Phi} = u_{12K} U_{1N\Phi} = 16.95\% \times 63.51 \text{ kV} = 10.765 \text{ kV}$$

$$I_{12K\Phi} = I_{1N\Phi} = 52.488 \text{ A}$$



$$Z_{12} = \frac{U_{12K\downarrow}}{I_{12K\downarrow}} = \frac{10.765 \times 10^3}{52.488} \Omega = 205.094 \Omega$$

$$R_{12} = \frac{P_{12K\downarrow}}{I_{12K\downarrow}^2} = \frac{37.067 \times 10^3}{52.488^2} \Omega = 13.454 \Omega$$

$$X_{12} = \sqrt{Z_{12}^2 - R_{12}^2} = \sqrt{205.094^2 - 13.454^2} \Omega = 204.652 \Omega$$

(2) 电压加于高压绕组, 低压绕组短路, 中压绕组开路。

$$P_{13K\downarrow} = \frac{1}{3} P_{13K} = \frac{1}{3} \times 148.7 \text{ kW} = 49.567 \text{ kW}$$

$$U_{13K\downarrow} = u_{13K} U_{1N\downarrow} = 10.1\% \times 63.51 \text{ kV} = 6.4145 \text{ kV}$$

$$I_{13K\downarrow} = I_{1N\downarrow} = 52.488 \text{ A}$$

$$Z_{13} = \frac{U_{13K\downarrow}}{I_{13K\downarrow}} = \frac{6.4145 \times 10^3}{52.488} \Omega = 122.209 \Omega$$

$$R_{13} = \frac{P_{13K\downarrow}}{I_{13K\downarrow}^2} = \frac{49.567 \times 10^3}{52.488^2} \Omega = 17.992 \Omega$$

$$X_{13} = \sqrt{Z_{13}^2 - R_{13}^2} = \sqrt{122.209^2 - 17.992^2} \Omega = 120.877 \Omega$$

(3) 电压加于中压绕组, 低压绕组短路, 高压绕组开路。

$$P_{23K\downarrow} = \frac{1}{3} P_{23K} = \frac{1}{3} \times 82.7 \text{ kW} = 27.567 \text{ kW}$$

$$U_{23K\downarrow} = u_{23K} U_{2N\downarrow} = 6.06\% \times 22.229 \text{ kV} = 1.347 \text{ kV}$$

$$I_{23K\downarrow} = I_{2N\downarrow} = 149.966 \text{ A}$$

$$Z_{23} = \frac{U_{23K\downarrow}}{I_{23K\downarrow}} = \frac{1.347 \times 10^3}{149.966} \Omega = 8.982 \Omega$$

$$R_{23} = \frac{P_{23K\downarrow}}{I_{23K\downarrow}^2} = \frac{27.567 \times 10^3}{149.966^2} \Omega = 1.2258 \Omega$$

$$X_{23} = \sqrt{Z_{23}^2 - R_{23}^2} = \sqrt{8.982^2 - 1.2258^2} \Omega = 8.898 \Omega$$

将  $Z_{23}$ 、 $R_{23}$ 、 $X_{23}$  归算到高压侧

$$k_{12} = \frac{U_{1N\downarrow}}{U_{2N\downarrow}} = \frac{63.51 \times 10^3}{22.229 \times 10^3} = 2.857$$

所以  $Z'_{23} = k_{12}^2 Z_{23} = 2.857^2 \times 8.982 \Omega = 73.315 \Omega$

$$R'_{23} = k_{12}^2 R_{23} = 2.857^2 \times 1.2258 \Omega = 10.006 \Omega$$

$$X'_{23} = k_{12}^2 X_{23} = 2.857^2 \times 8.898 \Omega = 72.629 \Omega$$

(4) 简化等效电路中的参数值。

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2}(R_{12} + R_{13} - R'_{23}) \\ &= \frac{1}{2}(13.454 + 17.992 - 10.006) \Omega = 10.72 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R'_2 &= \frac{1}{2}(R_{12} + R'_{23} - R_{13}) \\ &= \frac{1}{2}(13.454 + 10.006 - 17.992) \Omega = 2.73 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R'_3 &= \frac{1}{2}(R'_{23} + R_{13} - R_{12}) \\ &= \frac{1}{2}(10.006 + 17.992 - 13.454) \Omega = 7.27 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{1}{2}(X_{12} + X_{13} - X'_{23}) \\ &= \frac{1}{2}(204.652 + 120.877 - 72.629) \Omega = 126.45 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X'_2 &= \frac{1}{2}(X_{12} + X'_{23} - X_{13}) \\ &= \frac{1}{2}(204.652 + 72.629 - 120.877) \Omega = 78.20 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X'_3 &= \frac{1}{2}(X'_{23} + X_{13} - X_{12}) \\ &= \frac{1}{2}(72.629 + 120.877 - 204.652) \Omega = -5.57 \Omega \end{aligned}$$

**2-25** 一台 5 kVA、480 V/120 V 的普通两绕组变压器，改接成 600 V/480 V 的自耦变压器，试求改接后一次和二次侧的额定电流和变压器的容量。

**解** (1) 原双绕组变压器。

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{5 \times 10^3}{480} \text{ A} = 10.4167 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{5 \times 10^3}{120} \text{ A} = 41.6667 \text{ A}$$

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{480}{120} = 4$$

(2) 自耦变压器。把两绕组变压器改接成 600V/480V 的自耦变压器,如图 2-10 所示。把原来的一次绕组作为公共绕组,把原来的二次绕组作为串联绕组。

$$U_{1a} = U_{1N} + U_{2N} = (480 + 120) \text{ V} = 600 \text{ V}$$

$$U_{2a} = U_{1N} = 480 \text{ V}$$

$$k_a = \frac{N_1 + N_2}{N_1} = \frac{U_{1N} + U_{2N}}{U_{1N}} \\ = \frac{480 + 120}{480} = 1.25$$

$$I_{1a} = I_2 = 41.6667 \text{ A} \approx 41.67 \text{ A}$$

在忽略励磁电流的情况下,根据磁动势平衡关系,有

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0$$

即

$$\dot{I}_2 = -\frac{N_1}{N_2} \dot{I}_1 = -k \dot{I}_1$$

在图 2-10 中,对于 a 点,利用电路定律,可得自耦变压器的二次侧的电流

$$\dot{I}_{2a} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = \dot{I}_1 - (-k \dot{I}_1) = \dot{I}_1 + k \dot{I}_1 = (1 + k) \dot{I}_1$$

上式表明,当忽略励磁电流时,  $\dot{I}_{2a}$  和  $\dot{I}_1$  同相位,并且  $I_{2a}$  大于  $I_1$ 。就有效值来说,有

$$I_{2a} = (1 + k) I_1 = (1 + 4) \times 10.4167 \text{ A} = 52.08 \text{ A}$$

自耦变压器的额定容量

$$S_{aN} = U_{1aN} I_{1aN} = 600 \times 41.67 \text{ VA} = 25002 \text{ VA} = 25 \text{ kVA}$$

$$\text{或 } S_{aN} = U_{2aN} I_{2aN} = 480 \times 52.08 \text{ VA} = 24998 \text{ VA} = 25 \text{ kVA}$$

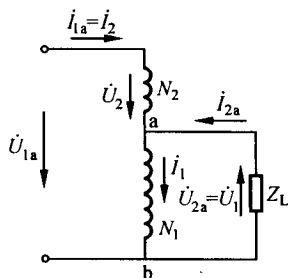


图 2-10 自耦变压器的原理图

## 2.3 经典题型

1. 变压器中励磁电抗  $X_m$  的物理意义是什么?希望变压器的  $X_m$  是 大好还是小好?若磁路不用铁心而是空心(即空气),则  $X_m$  是增加还是降低?如果一次绕组匝数增加 5%,而其余不变,则  $X_m$  将如何变化?如果

一、二次绕组各增加 5%，则  $X_m$  将如何变化？如果将铁心截面积减小 5%，而其余不变，则  $X_m$  将大致如何变化？如果铁心叠装时，硅钢片接缝间存在着较大的气隙，则对  $X_m$  有何影响？

答 (1) 励磁电抗  $X_m$  是主磁通在线圈中引起的感抗，代表了变压器铁心的导磁性能，反映了主磁通对电路的电磁效应。其大小正比于线圈匝数的平方及主磁路的磁导。

(2) 当主磁通一定时， $X_m$  越大，所需的励磁电流越小，所以希望变压器的  $X_m$  大一些好。

(3) 若磁路不用铁心而是空心（即空气），则因空气的磁导率较低，而使  $X_m$  降低，将导致电流很大而烧坏变压器。

(4) 若一次绕组匝数  $N_1$  增加 5% 时，即  $N'_1 = 1.05N_1$ 。由  $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$  可知，主磁通  $\Phi'_m = \frac{1}{1.05}\Phi_m$ ，即主磁通将下降 5% 左右，不考虑饱和时，磁动势也下降 5% 左右，即  $I'_m N'_1 = \frac{1}{1.05}I_m N_1$ ，励磁电流  $I'_m = \frac{1}{(1.05)^2}I_m$ ，所以  $X'_m = (1.05)^2 X_m = 1.10X_m$ ，励磁电抗  $X_m$  将增加 10% 左右。如果一、二次绕组匝数各增加 5%，则因磁动势平衡关系，励磁电抗仍增加 10% 左右。

(5) 如果铁心截面积减小 5%，则当其余不变时，变压器的主磁通不变，但磁通密度增加约 5%，铁心饱和程度增加，励磁电抗  $X_m$  随饱和程度的增加而下降。

(6) 如果铁心叠装时，硅钢片接缝间的气隙加大，则主磁路的磁阻将大大增加，励磁电流将增大，而励磁电抗  $X_m$  将减小。

2. 某单相变压器，额定电压  $U_{1N}/U_{2N} = 220\text{ V}/110\text{ V}$ ，额定频率  $f_N = 50\text{ Hz}$ 。如误将低压侧接入 220 V 电源，变压器将会发生一些什么异常现象？空载电流  $I_0$ 、励磁阻抗  $Z_m$ 、铁耗  $p_{Fe}$  与正常相比，会发生怎样的变化？如果将变压器误接到电压等于变压器额定电压的直流电源上，又会发生什么现象？

答 (1) 如果误将变压器的低压侧接到 220 V 电源上，由于  $U_2 \approx 4.44fN_2\Phi_m$ ，所以当  $U_2$  由 110 V 变到 220 V，即  $U_2$  增加为原额定电压

的2倍时,则变压器的主磁通 $\Phi_m$ 也将增加为正常运行时的2倍。因此,磁路的饱和程度将大大增加,因而励磁电流将大大增加,同理,变压器的空载电流也将大大增加,有可能烧毁绕组。另外,由于磁路的饱和程度大大增加,将会使变压器的铁耗大大增加,而使励磁电抗 $X_m$ 减小,同理励磁阻抗 $Z_m$ 也随之减小。

(2) 如果将变压器误接到电压等于变压器额定电压的直流电源上,由于电源为直流,变压器铁心中的磁通不交变,所以绕组中的感应电动势 $E_1 = E_2 = 0$ 。而且 $X_{10} = X_{20} = 0$ 。此时,变压器一次侧的电流 $I_1 = \frac{U_1 - E_1}{Z_{10}} = \frac{U_1 - 0}{R_1 + jX_{10}} = \frac{U_1}{R_1}$ ,由于绕组电阻 $R_1$ 很小,所以 $I_1 \gg I_{1N}$ ,会烧毁绕组。

3. 一台单相变压器如图2-11所示,其额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 220\text{ V}/110\text{ V}$ 。设高压侧加220 V电压时,励磁电流为 $I_m$ ,主磁通为 $\Phi_m$ 。若将X与a联在一起,在A、x端加330 V电压,此时的励磁电流、主磁通各为多大?若将X与x联在一起,在A、a端加110 V电压,则励磁电流、主磁通又各为多大?

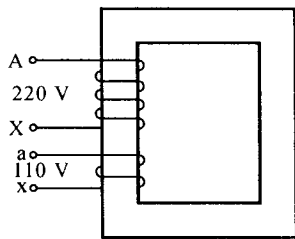


图2-11 单相变压器示意图

答 
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_{2N}}{U_{1N}} = \frac{110}{220} = \frac{1}{2}, N_2 = \frac{1}{2}N_1。$$

(1) 将X与a联在一起时,两个线圈顺极性串联,总电动势为两个同相位的电动势相加,故主磁通为 $\Phi_m$ 时,A、x端电动势为330 V,所以在A、x端加330 V电压时,铁心中的主磁通仍为 $\Phi_m$ 。由于铁心中的主磁通仍为 $\Phi_m$ ,因此,铁心的最大磁通密度不变,故磁路的磁阻不变。因为磁阻和主磁通都不变,所需的磁动势就不变。现因总匝数 $N' = N_1 + N_2 = \frac{3}{2}N_1$ ,为保证磁动势不变,即为保证 $I'_m N' = I_m N_1$ ,则 $I'_m = \frac{2}{3}I_m$ 。

(2) 将X与x联在一起时,两个线圈反极性串联,故总电动势为两

个电动势相减。主磁通为  $\Phi_m$  时, A、a 端电动势为 110 V, 所以在 A、a 端加 110 V 电压时, 铁心中的主磁通仍为  $\Phi_m$ 。因此, 所需的磁动势就不变。现因总匝数  $N'' = N_1 - N_2 = \frac{1}{2}N_1$ , 为保证磁动势不变, 即为保证  $I_m''N'' = I_mN_1$ , 则  $I_m'' = 2I_m$ 。

4. 变压器负载为纯电阻时, 变压器的输入和输出功率是什么性质的? 变压器负载为电容性负载时, 是否输入的无功功率一定是领先性质的?

答 (1) 变压器负载为纯电阻时, 变压器的输入功率主要是有功功率和数量不大的无功功率, 而变压器的输出功率纯为有功功率。

(2) 变压器负载为电容性负载时, 变压器输入的无功功率不一定是领先性质的, 因为变压器本身还需要落后性的无功功率建立磁场。若负载的领先性无功功率较大, 变压器输入的无功功率是领先性质的; 如果负载的领先性无功功率与变压器本身落后性无功功率相等, 则变压器输入的无功功率为零; 如果负载的领先性无功功率小于变压器本身落后性无功功率, 则变压器输入的无功功率为落后性无功功率。

5. 为什么变压器的空载损耗可以近似看成是铁耗, 短路损耗可以近似看成是铜耗? 在变压器一、二次侧分别做同一试验时, 测得的输入功率相同吗? 为什么?

答 (1) 变压器铁耗的大小取决于铁心中磁通密度的大小, 铜耗的大小取决于绕组中电流的大小。

当变压器做空载试验和短路试验时, 其输出功率都为零, 输入功率全部变为变压器的损耗, 即铁耗和铜耗之和。空载试验时, 电源电压为额定值, 铁心中磁通密度达到正常运行的数值, 铁耗也为正常运行时的数值, 而此时二次绕组中电流为零, 没有铜耗, 一次绕组中电流仅为励磁电流, 远远小于正常运行的数值, 它产生的铜耗相对于这时的铁耗可以忽略不计, 因而空载损耗可以近似看成为铁耗; 短路试验时, 输入功率为短路损耗, 此时, 一、二次绕组电流均为额定值, 铜耗也达到正常运行时的数值, 而电压却大大低于额定电压, 铁心中磁通密度也大大低于正常运行时的数值, 此时铁耗也大大低于正常运行时的数值, 铁耗与铜

耗相比可以忽略不计,因此短路损耗可近似看成为铜耗。

(2) 在一、二次侧分别做空载试验时,只要都加各自的额定电压,由于  $U_{1N} = kU_{2N}$ ,这两种情况下,铁心中的主磁通是相等的,即

$$\Phi_m = \frac{U_{1N}}{4.44fN_1} = \frac{kU_{2N}}{4.44fN_1} = \frac{N_1/N_2 \times U_{2N}}{4.44fN_1} = \frac{U_{2N}}{4.44fN_2}$$

所以铁耗相等,即电源输入的功率相同。

由于短路试验时所加电压很低,铁心中主磁通很小,铁耗可以忽略不计。因此,在一、二次侧分别做短路试验时,只要都加各自的额定电流,这两种情况下的铜耗就相等,即电源输入的功率相等。

6. 试证明 Yy0 联结组,  $U_{Cc} = U_{Bb} = U_{ab}(k-1)$ , 其中  $k = U_{AB}/U_{ab}$ 。

解 Yy0 联结组的绕组联结图及相量图如图 2-12 所示。

$$U_{Bb} = U_{AB} - U_{ab} = kU_{ab} - U_{ab} = U_{ab}(k-1)$$

$$U_{Cc} = U_{AC} - U_{ac} = kU_{ac} - U_{ac} = U_{ac}(k-1) = U_{ab}(k-1)$$

所以

$$U_{Bb} = U_{Cc} = U_{ab}(k-1)$$

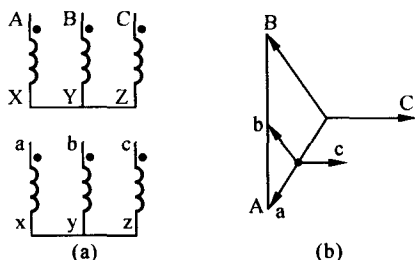


图 2-12 Yy0 联结组

(a) 接线图; (b) 相量图

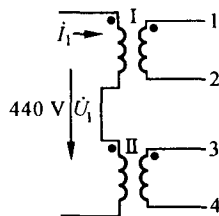


图2-13 两台单相变压器

一次侧串联

7. 两台完全相同的单相变压器,一、二次侧电压关系为  $220\text{ V}/110\text{ V}$ , 已知折合到原边的参数为一、二次绕组漏阻抗的标幺值  $Z_{1\sigma}^* = Z_{2\sigma}^* = 0.04 \angle 60^\circ$ , 励磁阻抗的标幺值  $Z_m^* = 40 \angle 60^\circ$ 。如图 2-13 所示,把两台变压器一次侧串联起来以后,接到  $440 \angle 0^\circ\text{ V}$  的电源上,求下述三种情况一次侧电流的大小(用标幺值表示)是多少?

(1) 端点 1 与 3 相联,2 与 4 相联;

(2) 端点 1 与 4 相联,2 与 3 相联;

(3) 第 I 台变压器二次侧开路, 第 II 台变压器二次侧短路。

解 (1) 把端点 1 与 3 相联, 2 与 4 相联后两台变压器二次侧电动势完全抵消, 所以二次侧回路电流为零, 一次侧电流为

$$I_1^* = \frac{U_1^*}{2Z_m^*} = \frac{440/220\angle 0^\circ}{2 \times 40\angle 60^\circ} = \frac{2\angle 0^\circ}{80\angle 60^\circ} = 0.025\angle -60^\circ$$

(2) 把端点 1 与 4 相联, 2 与 3 相联后, 一次侧电流为

$$\begin{aligned} I_1^* &= \frac{U_1^*}{2Z_{1s}^* + 2Z_{2s}^*} = \frac{440/220\angle 0^\circ}{2 \times (0.04 + 0.04)\angle 60^\circ} = \frac{2\angle 0^\circ}{0.16\angle 60^\circ} \\ &= 12.5\angle -60^\circ \end{aligned}$$

(3) 第 I 台变压器二次侧开路, 第 II 台变压器二次侧短路时, 电动势平衡方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_{1I} - \dot{E}_{1II} + 2\dot{I}_1 Z_{1s}$$

$$\dot{E}_{1I} = -\dot{I}_1 Z_m$$

$$\dot{E}_{1II} = -\dot{I}_2' Z_{2s}' = -\dot{I}_1 Z_{2s}'$$

所以

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_m + \dot{I}_1 Z_{2s}' + 2\dot{I}_1 Z_{1s}$$

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_m + 3Z_{1s}} \quad (\text{设铁心的最大磁密不变, 所以 } Z_m \text{ 不变})$$

$$I_1^* = \frac{U_1^*}{Z_m^* + 3Z_{1s}^*} = \frac{2\angle 0^\circ}{(40 + 3 \times 0.04)\angle 60^\circ} = 0.05\angle -60^\circ$$

8. 一台变比  $k = \frac{N_1}{N_2} = 3$  的单相变压器, 如图 2-14(a) 所示, 短路阻抗的标幺值  $Z_k^* = 0.08$ 。今将此变压器接成自耦变压器, 如图 2-14(b)

所示, 在低压侧 ax 绕组加电压作短路试验, 所加电压  $U_2^* = 0.06$ , 问此自耦变压器高压侧电流的标幺值是多大?

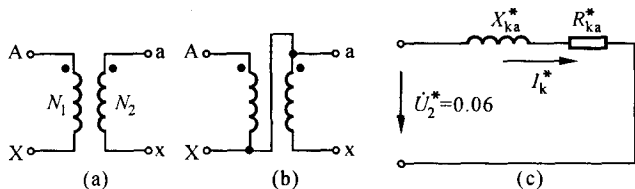


图 2-14 把两绕组变压器联结成自耦变压器



解 与两绕组变压器对应的自耦变压器变比  $k_s = 1 + k = 1 + 3 = 4$ 。

由于自耦变压器的短路阻抗等于把串联部分看成一次绕组、公共部分看成为二次绕组时的两绕组变压器的短路阻抗。虽然短路阻抗的实际值相等,但因为自耦变压器和两绕组变压器的阻抗基值不同,故自耦变压器的短路阻抗标么值

$$\begin{aligned} Z_{Ks}^* &= \frac{I_{1sN} Z_K}{U_{1sN}} = \frac{I_{1N} Z_K}{\left(1 + \frac{1}{k}\right) U_{1N}} = \left[ \frac{1}{1 + \frac{1}{k_s - 1}} \right] \frac{I_{1N} Z_K}{U_{1N}} \\ &= \left(1 - \frac{1}{k_s}\right) Z_K^* = \left(1 - \frac{1}{4}\right) \times 0.08 = 0.06 \end{aligned}$$

在低压侧 ax 绕组加电压,对自耦变压器做短路试验,对应的等效电路如图 2-14(c) 所示。高压侧短路电流的标么值

$$I_K^* = \frac{U_2^*}{Z_{Ks}^*} = \frac{0.06}{0.06} = 1$$

9. 有一台单相变压器,  $S_N = 50 \text{ kVA}$ ,  $U_{1N}/U_{2N} = 7200 \text{ V}/480 \text{ V}$ ,  $f_N = 60 \text{ Hz}$ 。

(1) 将此变压器高压侧加电压 156 V, 低压侧短路, 测得高压侧电流为 6.94 A, 输入功率为 612 W, 试计算短路参数的标么值  $R_K^*$  和  $X_K^*$ ;

(2) 将此变压器接在 50 Hz 电源上带负载运行, 在保持磁通密度和电流密度不变的条件下, 负载的功率因数  $\cos\varphi_2 = 0.9$  (滞后), 试计算额定负载时的电压调整率  $\Delta u$  (计算电压调整率可用近似公式)。

$$\text{解 } I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50000}{7200} \text{ A} = 6.94 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50000}{480} \text{ A} = 104.17 \text{ A}$$

(1) 短路参数的标么值  $R_K^*$  和  $X_K^*$ 。

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K} = \frac{156}{6.94} \Omega = 22.48 \Omega$$

$$R_K = \frac{P_K}{I_K^2} = \frac{612}{6.94^2} \Omega = 12.71 \Omega$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{22.48^2 - 12.71^2} \Omega = 18.54 \Omega$$

$$R_K^* = \frac{I_{1N} R_K}{U_{1N}} = \frac{6.94 \times 12.71}{7200} = 0.0123$$

$$X_K^* = \frac{I_{1N} X_K}{U_{1N}} = \frac{6.94 \times 18.54}{7200} = 0.0179$$

(2) 电压调整率  $\Delta u$ 。

①  $f' = 50$  Hz 时的短路参数的标么值  $R_K^*$  和  $X_K^*$ 。当电源频率改为 50 Hz 时, 为维持原来的电流密度与磁通密度不变, 则应保持变压器的额定电流不变, 而变压器的额定电压随频率正比降低为

$$U'_{1N} = \frac{f'}{f} U_{1N} = \frac{50}{60} \times 7200 \text{ V} = 6000 \text{ V}$$

短路电抗  $X_K$  也随频率正比降低为

$$X'_K = \frac{f'}{f} X_K = \frac{50}{60} \times 18.54 \Omega = 15.45 \Omega$$

短路电阻的标么值(电阻值不变)为

$$R_K^* = \frac{I_{1N} R_K}{U'_{1N}} = \frac{6.94 \times 12.71}{6000} = 0.0147$$

短路电抗的标么值为

$$X_K^* = \frac{I_{1N} X'_K}{U'_{1N}} = \frac{6.94 \times 15.45}{6000} = 0.0179$$

② 电压调整率  $\Delta u$ 。

因为

$$\cos \varphi_2 = 0.9$$

所以  $\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - (\cos \varphi_2)^2} = \sqrt{1 - 0.9^2} = 0.436$

$$\begin{aligned} \Delta u &= I^* (R_K^* \cos \varphi_2 + X_K^* \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= 1.0 \times (0.0147 \times 0.9 + 0.0179 \times 0.436) \times 100\% \\ &= 2.10\% \end{aligned}$$

## 2.4 补充习题及解答

### 2.4.1 补充习题

1. 变压器空载运行时, 一次侧加额定电压, 已知一次绕组电阻  $R_1$

很小,为什么电流并不大?电力变压器磁路不用铁心而是空心(即空气),行不行?为什么?

2. 变压器一、二次绕组并没有直接的电路联结,可是当负载运行时,二次侧电流增大或减小的同时,一次侧电流也跟着增大或减小,这是为什么?

3. 变压器额定负载运行时,其效率是否为一个定值?与负载性质有关系吗?

4. 变压器负载性质一定时,其效率是否为定值?与负载大小有关系吗?

5. 变压器的简化等效电路与 T 形等效电路相比,忽略了什么量?这两种等效电路各适用于什么场合?

6. 三相变压器的变比和线电压比有什么区别?进行归算时用前者还是用后者?

7. 在单相电力变压器中,为了得到正弦波形的感应电动势,若不考虑磁滞与涡流损耗,在铁心不饱和与饱和两种情况下,空载励磁电流各呈何种波形?该电流与主磁通在时间上同相吗?若考虑磁滞和涡流损耗,情况又将如何?

8. 变压器进行绕组归算时,若将二次侧向一次侧归算,哪些量改变?怎样改变?哪些量不变?为什么?若将一次侧向二次侧归算时又怎样?

9. 有一个单相变压器铁心,其导磁面积  $A = 120 \text{ cm}^2$ ,其磁通密度最大值  $B_m = 1.3 \text{ T}$ ,电源频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,欲制成额定电压  $U_{1N}/U_{2N} = 1000 \text{ V}/220 \text{ V}$  的单相变压器,试计算一、二次绕组的匝数(不计漏阻抗)。

10. 有一台单相变压器,额定容量  $S_N = 50 \text{ kVA}$ ,高、低压绕组均由两个线圈组成,高压侧每个线圈的额定电压为  $1100 \text{ V}$ ,低压侧每个线圈的额定电压为  $110 \text{ V}$ 。现将它们进行不同方式的联结,试问:可得几种不同的变比?每种联结时,高、低压侧的额定电流为多少?

11. 根据图 2-15 所示的绕组联结图,用相量图确定出其联结组标号。

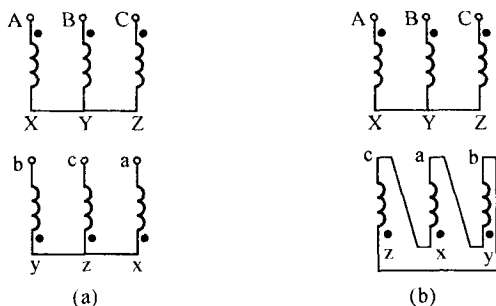


图 2-15 变压器绕组联结图

12. 一台三相电力变压器, 额定容量  $S_N = 1000 \text{ kVA}$ , 额定电压  $U_{1N}/U_{2N} = 10000 \text{ V}/3300 \text{ V}$ , 联结组标号为 Yd11, 短路阻抗标幺值  $Z_K^* = 0.015 + j0.052$ , 带三相  $\Delta$  联结对称负载, 每相负载阻抗  $Z_L = (54 + j86) \Omega$ , 试求: 一次侧电流  $I_1$ 、二次侧电流  $I_2$  和二次侧电压  $U_2$ 。

13. 一台三相变压器铭牌数据如下:  $S_N = 750 \text{ kVA}$ ,  $U_{1N}/U_{2N} = 10000 \text{ V}/400 \text{ V}$ , 联结组标号为 Yy0。一、二次绕组为铜线绕制。

低压侧空载试验数据为

$$U_{20} = 400 \text{ V}, \quad I_{20} = 60 \text{ A}, \quad P_0 = 3800 \text{ W}$$

高压侧短路试验数据为

$$U_{1K} = 440 \text{ V}, \quad I_{1K} = 43.3 \text{ A}, \quad P_K = 10900 \text{ W}$$

室温为  $20^\circ\text{C}$ , 试求:

- (1) 归算到一次侧时等效电路的参数(设  $R_1 = R'_2$ ,  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$ );
- (2) 当额定负载,  $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后)时, 变压器的电压调整率  $\Delta u$ 、二次侧电压  $U_2$  及效率  $\eta$ ;
- (3) 当额定负载,  $\cos\varphi_2 = 0.8$ (超前)时, 变压器的调整率  $\Delta u$ 、二次侧电压  $U_2$  及效率  $\eta$ 。

14. 某变电所有三台联结组标号为 Yyn0 的三相变压器并联运行, 其各自数据如下:

$$S_{N\text{I}} = 3200 \text{ kVA}, \quad U_{1N}/U_{2N} = 35 \text{ kV}/6.3 \text{ kV}, \quad Z_{K\text{I}}^* = 0.069$$

$$S_{N\text{II}} = 5600 \text{ kVA}, \quad U_{1N}/U_{2N} = 35 \text{ kV}/6.3 \text{ kV}, \quad Z_{K\text{II}}^* = 0.073$$

$$S_{N\text{III}} = 3200 \text{ kVA}, \quad U_{1N}/U_{2N} = 35 \text{ kV}/6.3 \text{ kV}, \quad Z_{K\text{III}}^* = 0.076$$

试计算:

(1) 总输出容量为 10000 kVA 时, 各台变压器分担的负载(容量)是多少?

(2) 不允许任何一台过载时的最大输出容量是多少?

15. 一台单相自耦变压器数据如下:  $U_{1a} = 220 \text{ V}$ ,  $U_{2a} = 180 \text{ V}$ ,  $\cos\varphi_2 = 1.0$ ,  $I_{2a} = 400 \text{ A}$ 。当不计损耗和漏阻抗压降时, 试求:

(1) 自耦变压器各部分绕组内的电流是多少?

(2) 输入容量、输出容量、电磁感应传递容量、直接传递容量各为多少?

### 2.4.2 补充习题解答

1. 答 在电源电压一定时, 变压器的空载电流值是取决于励磁电抗  $X_m$ , 而不是一次绕组电阻  $R_1$ 。由于变压器的励磁电抗  $X_m$  很大, 故空载电流很小。如果把变压器的铁心去掉, 其磁路成为空心(即空气),  $X_m$  将大大降低, 导致电流很大而烧坏变压器, 故是不行的。

2. 答 尽管变压器一、二次绕组没有直接的电路联结, 但它们共用一个主磁路, 都环链同一铁心。

由于变压器一次绕组的阻抗压降很小, 故  $I_1 Z_1$  的变化对  $E_1$  数值的影响可以略去不计。因此, 在电网电压和频率不变时, 从空载到额定负载, 可以认为电动势  $E_1$  及与之对应的主磁通  $\Phi_m$  和产生  $\Phi_m$  的磁动势基本不变, 即负载时的励磁磁动势和空载时的磁动势相等, 即

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1$$

或

$$I_1 N_1 = I_0 N_1 + (-I_2 N_2)$$

两边除以  $N_1$ , 则得电流方程式为

$$I_1 = I_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} I_2\right) = I_0 + \left(-\frac{1}{k} I_2\right) = I_0 + (-I_2')$$

由上式可知, 变压器负载时一次绕组电流  $I_1$  (或磁动势  $I_1 N_1$ ) 由两个分量组成:  $I_0$  (或  $I_0 N_1$ ) 是用来产生负载时的主磁通的励磁分量; 而  $-I_2'$  (或  $-I_2' N_2$ ) 是用来补偿二次绕组磁动势  $I_2 N_2$  对主磁通影响的分量, 称为负载分量。所以, 当变压器二次绕组电流改变时, 必将引起一次

绕组电流的改变,以平衡二次绕组电流所产生的影响,相应地二次侧输出功率的变化,必然引起一次侧从电网吸取的功率的变化,电能就是通过这样的方式由一次侧传送到二次侧的。

3. 答 额定负载效率  $\eta_N$  不是一个定值,它与负载的性质有关系。虽然额定负载时,变压器的铜耗和铁耗是固定了,但是变压器的输出功率与负载的性质有关,因而其输入功率也与负载的性质有关,故变压器额定负载运行时,其效率随负载的性质而变化。

举一个特例来看,当变压器额定负载运行时,如果二次侧带纯电感负载或纯电容负载时,输出有功功率为零,则变压器的效率为零。因此,当变压器额定负载运行时,以负载为纯电阻时的效率为最高。

4. 答 变压器负载性质一定时,其效率一般不是一个定值,它与负载的大小有关,即与负载电流的标幺值  $I_2^*$  有关。在  $\cos\varphi_2 = \text{常数}$  下,效率随负载电流变化的曲线  $\eta = f(I_2^*)$ ,称为效率曲线。

从效率曲线可以看出,负载很小时,输出功率很小,变压器的效率很低;随着负载的增大,效率逐渐升高;当  $I_2^* = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KN}}}$  时,效率达到最大值,  $\eta = \eta_{\max}$ 。此时,如果负载再增大,由于变压器的短路损耗  $P_K \propto I_2^2$ ,变压器损耗比负载增加得快,效率反而开始降低了。

5. 答 T形等效电路反映了变压器内部的电磁关系,因而能准确地代表实际的变压器,但它含有串联和并联电路,进行复数运算比较麻烦。实际电力变压器中,由于励磁电流  $I_m \ll I_N$ ,在工程实际中可以忽略  $I_m$ ,即去掉励磁支路,而得到一个简单的串联电路,称为变压器的简化等效电路。因此,简化等效电路是在将 T形等效电路中的励磁阻抗  $|Z_m|$  视为无穷大时得到的,也就是在励磁电流  $I_m = -\frac{\dot{E}_1}{Z_m} = 0$ ,即忽略了励磁电流  $I_m$  的情况下得到的。

T形等效电路适用于一次绕组加交流额定电压时各种运行情况的分析与计算;而简化等效电路只适用于变压器负载运行时计算一、二次电流和二次电压的场合,如计算变压器的电压调整率和并联运行时的

负载分配等。

6. 答 三相变压器的变比与单相变压器的变比一样,表示一、二次侧相电动势之比,它等于一、二次绕组匝数之比。而三相变压器的线电压比是指一、二次侧线电压之比,显然它可能等于变比,或等于变比的 $\sqrt{3}$ 倍(或 $1/\sqrt{3}$ ),它的大小既与一、二次绕组匝数有关,也与一、二次绕组的联结法(Y联结或 $\Delta$ 联结)有关。

三相变压器进行归算时,要用变比,而不能用线电压比。

7. 答 在铁心不饱和时,变压器铁心的磁化曲线(励磁电流和主磁通的关系曲线)是线性的,所以当感应电动势的波形为正弦波即主磁通为正弦波时,励磁电流也为正弦波。

当铁心饱和时,变压器铁心的磁化曲线是非线性的,即主磁通增加,励磁电流增加更多,所以,当感应电动势的波形为正弦波,即主磁通为正弦波时,励磁电流为非正弦波,在主磁通大的区域,励磁电流更大,为尖顶波。

若不考虑磁滞和涡流损耗,励磁电流与主磁通在时间上同相位,即与感应电动势相差 $90^\circ$ ,没有励磁功率损耗;若考虑磁滞和涡流损耗,励磁电流将超前主磁通一个小角度(称铁耗角 $\alpha_{Fe}$ ),这个角度的大小将由磁滞和涡流损耗的大小来决定,损耗大则角度大,损耗小则角度小。

8. 答 由二次侧向一次侧归算时,二次侧的量如电压、电动势、电流及阻抗改变,而原边的量不变。归算前后各量关系都与变比 $k$ 有关,即 $\dot{U}'_2 = k\dot{U}_2$ 、 $\dot{E}'_2 = k\dot{E}_2$ 、 $\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}$ 、 $Z'_{2\sigma} = k^2 Z_{2\sigma}$ 、 $Z'_L = k^2 Z_L$ 。各量的相位关系及功率和损耗不变。

由一次侧向二次侧归算时,二次侧的量都不变,一次侧的电压、电动势、电流及电抗都应改变,即 $\dot{U}'_1 = \frac{\dot{U}_1}{k}$ 、 $\dot{E}'_1 = \frac{\dot{E}_1}{k}$ 、 $\dot{I}'_1 = k\dot{I}_1$ 、 $Z'_{1\sigma} = \frac{Z_{1\sigma}}{k^2}$ 。但各量的相位关系不变。

同理,对于励磁阻抗的归算应视具体情况而定。当电压加在二次侧做开路试验时,所求取的励磁阻抗 $Z'_m$ 是变压器二次侧的数值,若将其归

算到一次侧,则应乘以  $k^2$ ,即  $Z_m = k^2 Z'_m$ 。当电压加在一次侧做开路试验时,所求取的励磁阻抗  $Z_m$  是变压器一次侧的数值,若将其归算到二次侧,则应除以  $k^2$ ,即  $Z'_m = \frac{Z_m}{k^2}$ 。

9. 解 因为  $B_m = \frac{\Phi_m}{A}$

所以  $\Phi_m = B_m A = 1.3 \times 120 \times 10^{-4} \text{ Wb} = 0.0156 \text{ Wb}$

因为  $U_{1N} \approx E_1 = 4.44 f_N N_1 \Phi_m$

所以  $N_1 \approx \frac{U_{1N}}{4.44 f_N \Phi_m} = \frac{1000}{4.44 \times 50 \times 0.0156} = 289$

因为  $U_{2N} \approx E_2 = 4.44 f_N N_2 \Phi_m$

所以  $N_2 \approx \frac{U_{2N}}{4.44 f_N \Phi_m} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 0.0156} = 64$

10. 解  $k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}, I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}, I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$ 。

可有四种不同方式的联结。

① 高、低压均串联。

$$k = \frac{2200}{220} = 10, I_{1N} = \frac{50 \times 10^3}{2200} \text{ A} = 22.72 \text{ A}, I_{2N} = \frac{50 \times 10^3}{220} \text{ A} = 227.2 \text{ A}。$$

② 高、低压侧均并联。

$$k = \frac{1100}{110} = 10, I_{1N} = \frac{50 \times 10^3}{1100} \text{ A} = 45.45 \text{ A}, I_{2N} = \frac{50 \times 10^3}{110} \text{ A} = 454.5 \text{ A}。$$

③ 高压侧串联, 低压侧并联。

$$k = \frac{2200}{110} = 20, I_{1N} = \frac{50 \times 10^3}{2200} \text{ A} = 22.72 \text{ A}, I_{2N} = \frac{50 \times 10^3}{110} \text{ A} = 454.5 \text{ A}。$$

④ 高压侧并联, 低压侧串联。

$$k = \frac{1100}{220} = 5, I_{1N} = \frac{50 \times 10^3}{1100} \text{ A} = 45.45 \text{ A}, I_{2N} = \frac{50 \times 10^3}{220} \text{ A} = 227.2 \text{ A}。$$

11. 解 (1) 根据图 2-16(a) 可知, 图 2-15(a) 所示绕组联结图的联结组标号为 Yy2。

(2) 根据图 2-16(b) 可知, 图 2-15(b) 所示绕组联结图的联结组标号为 Yd9。



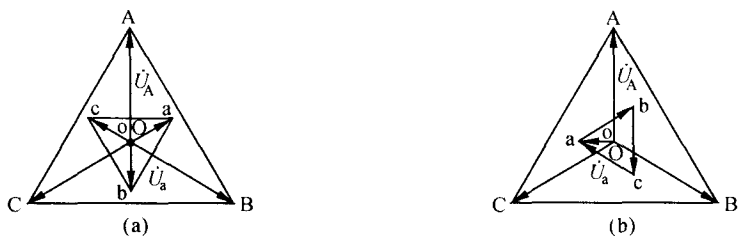


图 2-16 用相量图确定联结组标号

$$12. \text{ 解 } U_{1N\dot{+}} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 10000 \text{ V}, U_{2N\dot{+}} = U_{2N} = 3300 \text{ V}$$

$$I_{1N\dot{+}} = I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10000} \text{ A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 100 \text{ A}$$

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N\dot{+}}}{I_{1N\dot{+}}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 10000}{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 100} \Omega = 100 \Omega$$

$$Z_K = Z_K^* Z_{1N} = (0.015 + j0.052) \times 100 \Omega = (1.5 + j5.2) \Omega$$

$$k = \frac{U_{1N\dot{+}}}{U_{2N\dot{+}}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 10000}{3300} = 1.75$$

$$Z'_L = k^2 Z_L = 1.75^2 \times (54 + j86) \Omega = (165.38 + j263.38) \Omega$$

$$Z = Z_K + Z'_L = (1.5 + j5.2 + 165.38 + j263.38) \Omega \\ = (166.88 + j268.58) \Omega = 316.20 \angle 58.15^\circ \Omega$$

$$I_1 = I_{1\dot{+}} = \frac{U_{1N\dot{+}}}{Z} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 10000}{316.20} \text{ A} = 18.26 \text{ A}$$

$$I_2 = \sqrt{3} I_{2\dot{+}} = \sqrt{3} k I_{1\dot{+}} = \sqrt{3} \times 1.75 \times 18.26 \text{ A} = 55.35 \text{ A}$$

$$U_2 = U_{2\dot{+}} = I_{2\dot{+}} Z_L = k I_{1\dot{+}} Z_L = 1.75 \times 18.26 \times \sqrt{54^2 + 86^2} \text{ V} \\ = 3244.97 \text{ V}$$

13. 解 (1) 归算到一次侧时等效电路的参数。

$$k = \frac{U_{1N\dot{+}}}{U_{2N\dot{+}}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N}}{\frac{1}{\sqrt{3}} U_{2N}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{10000}{400} = 25$$

空载试验:

从二次侧测得

$$Z''_m \approx \frac{U_{20\phi}}{I_{20\phi}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} U_{20}}{I_{20}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 400}{60} \Omega = 3.85 \Omega$$

$$R''_m \approx \frac{P_{0\phi}}{I_{20\phi}^2} = \frac{\frac{1}{3} P_0}{I_{20}^2} = \frac{\frac{1}{3} \times 3800}{60^2} \Omega = 0.35 \Omega$$

归算到一次侧

$$Z_m = k^2 Z''_m = 25^2 \times 3.85 \Omega = 2406 \Omega$$

$$R_m = k^2 R''_m = 25^2 \times 0.35 \Omega = 218.8 \Omega$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{2406^2 - 218.8^2} \Omega = 2396 \Omega$$

短路试验:

$$Z_K = \frac{U_{1K\phi}}{I_{1K\phi}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} U_{1K}}{I_{1K}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 440}{43.3} \Omega = 5.867 \Omega$$

$$R_K = \frac{P_{K\phi}}{I_{1K\phi}^2} = \frac{\frac{1}{3} P_K}{I_{1K}^2} = \frac{\frac{1}{3} \times 10900}{43.3^2} \Omega = 1.938 \Omega$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{5.867^2 - 1.938^2} \Omega = 5.538 \Omega$$

换算到 75°C 时

$$R_{K75^\circ\text{C}} = \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta} R_K = \frac{234.5 + 75}{234.5 + 20} \times 1.938 \Omega = 2.357 \Omega$$

$$Z_{K75^\circ\text{C}} = \sqrt{R_{K75^\circ\text{C}}^2 + X_K^2} = \sqrt{2.357^2 + 5.538^2} \Omega = 6.019 \Omega$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{1}{2} R_{K75^\circ\text{C}} = \frac{1}{2} \times 2.357 \Omega = 1.179 \Omega$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{1}{2} X_K = \frac{1}{2} \times 5.538 \Omega = 2.769 \Omega$$

(2) 当额定负载,  $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时,  $\Delta u$ 、 $U_2$  及  $\eta$ 。

Y 联结  $U_{1N\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 10000 \text{ V}$

$$I_{1N\ddagger} = I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10000} \text{ A} = 43.3 \text{ A}$$

$$\cos\varphi_2 = 0.8(\text{滞后}), \quad \sin\varphi_2 = 0.6$$

在额定负载下  $I_2^* = 1.0$

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{I_{1N\ddagger} R_{K75^\circ\text{C}} \cos\varphi + I_{1N\ddagger} X_K \sin\varphi}{U_{1N\ddagger}} \times 100\% \\ &= \frac{43.3 \times 2.357 \times 0.8 + 43.3 \times 5.538 \times 0.6}{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 10000} \times 100\% \\ &= 3.91\% \end{aligned}$$

$$U_2 = U_{2N}(1 - \Delta u) = 400 \times (1 - 0.0391) \text{ V} = 384.36 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \left( 1 - \frac{P_0 + I_2^{*2} P_{KN}}{S_N I_2^* \cos\varphi_2 + P_0 + I_2^{*2} P_{KN}} \right) \times 100\% \\ &= \left( 1 - \frac{3800 + 1.0^2 \times 10900}{750000 \times 1.0 \times 0.8 + 3800 + 1.0^2 \times 10900} \right) \times 100\% \\ &= 97.61\% \end{aligned}$$

(3) 当额定负载,  $\cos\varphi_2 = 0.8$ (超前) 时,  $\Delta u$ 、 $U_2$  及  $\eta$ 。

$$\cos\varphi_2 = 0.8(\text{超前}), \quad \sin\varphi_2 = -0.6$$

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{I_{1N\ddagger} R_{K75^\circ\text{C}} \cos\varphi_2 + I_{1N\ddagger} X_K \sin\varphi_2}{U_{1N\ddagger}} \times 100\% \\ &= \frac{43.3 \times 2.357 \times 0.8 + 43.3 \times 5.538 \times (-0.6)}{\frac{1}{\sqrt{3}} \times 10000} \times 100\% \\ &= -1.08\% \end{aligned}$$

$$U_2 = U_{2N}(1 - \Delta u) = 400 \times (1 + 0.0108) \text{ V} = 404.32 \text{ V}$$

$$\eta = 97.61\%$$

$\eta$  值与(2)的相同。

14. 解 (1) 各台变压器分担的负载。假定各台变压器分担的负载分别为  $S_I$ 、 $S_{II}$ 、 $S_{III}$ , 则

$$S_I : S_{II} : S_{III} = \frac{S_{NI}}{Z_{KI}^*} : \frac{S_{NII}}{Z_{KII}^*} : \frac{S_{NIII}}{Z_{KIII}^*}$$

$$S_{\text{I}} + S_{\text{II}} + S_{\text{III}} = S_{\Sigma} = 10000 \text{ kVA}$$

从而解得

$$S_{\text{I}} = 2860 \text{ kVA}$$

$$S_{\text{II}} = 4544 \text{ kVA}$$

$$S_{\text{III}} = 2596 \text{ kVA}$$

(2) 最大输出容量  $S_{\text{max}}$ 。

因为几台变压器并联运行时, 其中  $Z_k^*$  最小的那一台变压器先过载。所以, 变压器 I 先过载。为不允许任何一台过载, 取  $I_1^* = 1$ 。根据

$$I_1^* : I_{\text{II}}^* : I_{\text{III}}^* = \frac{1}{Z_{k\text{I}}^*} : \frac{1}{Z_{k\text{II}}^*} : \frac{1}{Z_{k\text{III}}^*}$$

从而得

$$I_{\text{II}}^* = \frac{Z_{k\text{I}}^*}{Z_{k\text{II}}^*} I_1^* = \frac{0.069}{0.073} \times 1.0 = 0.9452 = S_{\text{II}}^*$$

$$I_{\text{III}}^* = \frac{Z_{k\text{I}}^*}{Z_{k\text{III}}^*} I_1^* = \frac{0.069}{0.076} \times 1.0 = 0.9079 = S_{\text{III}}^*$$

则输出最大容量

$$\begin{aligned} S_{\text{max}} &= S_{\text{NI}} + S_{\text{II}}^* S_{\text{NII}} + S_{\text{III}}^* S_{\text{NIII}} \\ &= (3200 + 0.9452 \times 5600 + 0.9079 \times 3200) \text{ kVA} \\ &= 11398.4 \text{ kVA} \end{aligned}$$

15. 解 (1) 各部分绕组内电流。

$$\text{变比 } k_s = \frac{U_{1s}}{U_{2s}} = \frac{220}{180} = 1.222$$

$$\text{串联绕组电流 } I_{1s} = \frac{I_{2s}}{k_s} = \frac{400}{1.222} \text{ A} = 327.33 \text{ A}$$

$$\text{公共绕组电流 } I = I_{2s} - I_{1s} = (400 - 327.33) \text{ A} = 72.67 \text{ A}$$

(2) 各种容量。

$$\text{输入容量 } U_{1s} I_{1s} = (220 \times 327.33) \text{ VA} = 72 \text{ kVA}$$

$$\text{输出容量 } U_{2s} I_{2s} = (180 \times 400) \text{ VA} = 72 \text{ kVA}$$

$$\text{电磁感应传递容量 } U_{2s} I = (180 \times 72.67) \text{ VA} = 13.08 \text{ kVA}$$

$$\text{直接传递容量 } U_{2s} I_{1s} = (180 \times 327.33) \text{ VA} = 58.92 \text{ kVA}$$

## 第3章 直流电机

### 3.1 重点和难点

#### 3.1.1 重点

(1) 电枢绕组是直流电机的重要部件,直流绕组是一个闭合绕组,每个元件的两个端点分别联结在两个换向片上,每个换向片联结两个元件,各元件按一定的规律联结形成闭合回路。电枢旋转时绕组中的感应电动势是交变的,频率为  $f = \frac{pn}{60}$ ,整个闭合回路中各元件感应电动势之和为零。所以只有合理安置电刷,将电枢绕组分成若干条支路,才能通过电刷和换向器与外电路联结。在直流发电机中,旋转的换向器和静止的电刷构成一个机械装置,它将电枢元件内的交流电整流成外电路的直流电。在直流电动机中,电刷和换向器构成了一个机械逆变器,它将外电路中的直流电逆变成电枢元件中的交流电。电枢绕组元件联结方式不同,即有不同的节距  $y_1$ 、 $y_2$  和  $y$ ,其并联支路数也就不同。在单叠绕组中,  $a = p$ ;在单波绕组中,  $a = 1$ 。

(2) 电枢绕组的感应电动势和电磁转矩是直流电机的两个基本物理量,相对应的两个计算公式也是基本公式,即

$$E_a = C_e \Phi n, \quad C_e = \frac{pN}{60a}$$

$$T_e = C_T \Phi I_a, \quad C_T = \frac{pN}{2\pi a}$$

$$\frac{C_T}{C_e} = \frac{\frac{pN}{2\pi a}}{\frac{pN}{60a}} = \frac{60}{2\pi} = 9.55$$

由  $E_a$  和  $T_e$  的表达式可得  $T_e = \frac{E_a I_a}{\Omega}, \quad \Omega = \frac{2\pi n}{60}$

(3) 直流发电机稳态运行的基本方程。

电压平衡方程为

$$E_a = U + I_a R + 2\Delta U_s = U + I_a R_s$$

转矩平衡方程为

$$T_1 = T_e + T_0$$

功率平衡方程为

$$P_1 = P_2 + \sum p = P_2 + p_{Cu} + p_{Fe} + p_{\Omega} + p_{\Delta} + p_{Cu}$$

在他励直流发电机中,电枢电流即为线路电流,即  $I_a = I$ 。

在并励直流发电机中,电枢电流为线路电流和励磁电流之和,即  $I_a = I + I_f$ 。

(4) 直流发电机运行时,转速  $n$  通常不变,其变量通常为电枢电流  $I_a$ ,励磁电流  $I_f$  和端电压  $U$ ,将它们之间的关系用曲线表示,便会得到不同的特性,常有空载特性、外特性、调节特性和效率特性,其中外特性  $U = f(I)$  是最重要的特性。电压变化率是其主要性能指标,励磁方式不同,负载电流  $I$ 、电枢电流  $I_a$ 、励磁电流  $I_f$  之间的关系不同,则发电机的特性曲线也会有很大的差异,积复励发电机电压变化率最小,说明当负载变化时,发电机的端电压变化不大,而他励、并励、差复励发电机,当负载变化时,端电压的变化依次增大。

(5) 并励发电机要建立稳定电压必须满足三个条件:

① 电机有剩磁;

② 励磁绕组产生的磁通与剩磁方向一致,即励磁绕组与电枢绕组的联结方式和电枢旋转方向必须配合正确;

③ 磁化曲线与励磁回路的电阻线相交,即励磁回路电阻必须小于相应的临界电阻。

由此可见,发电机的空载电压与励磁回路电阻的大小及电机的转速高低有关。

(6) 直流电机的运行状态可通过比较  $E_a$  和  $U$  的大小来确定。当  $U > E_a$  时,  $I_a$  与  $E_a$  方向相反,电磁转矩为拖动性转矩,此时为电动机状态;反之为发电机状态。电动机的基本方程如下。

电压平衡方程为

$$U = E_a + I_a R + 2\Delta U_s = E_a + I_a R_a$$

转矩平衡方程为

$$T_e = T_2 + T_0$$

功率平衡方程为

$$P_1 = P_2 + \sum p = P_2 + p_{\Omega} + p_{Fe} + p_{Cu a} + p_{Cuf} + p_{\Delta}$$

(7) 直流电动机的主要特性有机械特性、转速特性、转矩特性及效率特性等。励磁方式不同,特性曲线和数学表达式也不同。直流电动机使用时应注意,并励电动机励磁回路不允许开路,串励电动机不允许空载运行,这是因为此时每极磁通很小,电机转速过高,可能会损坏电机。由此可知,直流电动机常用的是复励电动机。

(8) 直流电动机有良好的调速性能,其转速

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_{\Omega})}{C_e \Phi}$$

由上式可知,常用的调速方法有以下三种。

① 调节励磁电流以改变每极磁通  $\Phi$  来调速。这可通过改变励磁回路的电阻来实现。这是一种既简单又经济的调速方法,属于恒功率调速,理论上调速范围很宽,实际上受电机最高转速和损耗大小的限制,调速范围大打折扣。调速前后各物理量的关系为

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

② 调节电源电压  $U$  来调速。该方法调速范围宽,机械特性较好,属于恒转矩调速,但需专用电源。

③ 电枢回路中串入可调电阻  $R_{\Omega}$  来调速。该方法简单,属于恒转矩调速,但只能将速度向下调,且在调速电阻上会产生很大的损耗,不经济。

(9) 直流电动机启动转矩与启动电流成正比,因此启动性能比异步电动机好。常用的启动方法有直接启动,但这种方法的启动电流大,会产生较大的火花。为限制启动电流,可在电枢回路中串入变阻器或采用降低电源电压的方法启动。

(10) 直流电动机的制动可根据不同的应用场合采用不同的方法,常用的如下。

① 能耗制动。该方法操作简便,但动能转换成电能后的能量大部分消耗在制动电阻上,且在低速时制动力矩很小,故常与机械制动结合起来使用。通常用于对制动要求不高的场合。

② 反接制动。该方法制动速度快,但制动时电枢电流太大,为此常在电枢回路中串一较大的电阻以限制制动电流,此外当速度降到零时,必须及时断开电源,否则电动机将反转。常用于制动力矩较大的场合。

③ 回馈制动。该方法是将部分机械能转换成电能再反馈给电网。这种方法的优点是可以不改变电动机的接线或进行简单的改接即可完成该转换;缺点是该转换过程只能在理想空载转速以上完成,电动机一直处于较高的转速下。主要用于限制电动机转速的升高,如电力机车下坡时的限速或直流电动机由高速向低速调速的场合。

### 3.1.2 难点

(1) 直流电机的电枢绕组是其关键部件,为对电机进行全面的分析,必须考虑其绕组展开图,画绕组展开图的步骤如下。

① 找出元件数  $S$ ,换向片数  $K$  和虚槽数  $Q_u$  之间的关系。在单层绕组中,有

$$S = K = Q_u = uQ$$

② 计算节距。

第一节距  $y_1$ : 
$$y_1 = \frac{Q_u}{2p} \mp \epsilon$$

合成节距  $y$ :

对于单叠绕组 
$$y = y_1 - y_2 = \pm 1$$

取 + 号时为右行绕组(常用),取 - 号时为左行绕组。

对于单波绕组 
$$y = y_1 + y_2 = \frac{K \pm 1}{p}$$

取 + 号时为右行绕组,取 - 号时为左行绕组(常用)。

换向器节距  $y_c$ : 
$$y_c = y$$

③ 根据绕组形式和节距写出各元件的联结规律。



④ 画出具有  $Q_a$  个槽的直流电机的铁心展开图, 并进行编号。

⑤ 根据联结规律在  $Q_a$  个槽的铁心展开图中依次放入各元件(为方便和清楚起见, 可使元件上层边所在的槽号和元件号相同), 直到将所有元件放完后组成一个闭合的回路为止。

⑥ 根据磁极的个数, 按  $(0.67 \sim 0.75)\tau$  的宽度并按 N、S 极相间的规律将磁极均匀地放在绕组展开图中。

⑦ 放置电刷, 一般有几对磁极就放几对电刷, 在绕组元件的两个有效边对中心线左右对称的情况下, 电刷应放置在磁极的中心线上, 并将极性相同的电刷进行并联联结。

⑧ 画电枢绕组的电路图。对于单叠绕组,  $a = p$ ; 对于单波绕组,  $a = 1$ 。

总之, 直流电枢电路是一个多支路电路, 对电路内部来说, 它是一个闭合回路, 从外面观察, 同极(叠绕组)或同极性(波绕组)磁极下的元件串联后通过电刷组成多支路电路, 当电枢旋转时, 元件中感应出交流电动势, 通过换向器从电刷上引出的电动势则是直流电动势。

(2) 直流电机的电枢反应与电刷位置关系密切。电刷在几何中性线上时, 电枢绕组的合成电动势最大, 电磁转矩也最大, 此时只有交轴电枢反应, 引起气隙磁密发生畸变。在磁路不饱和时, 交轴电枢反应磁场对主磁场的大小没有影响; 在磁路饱和时产生去磁作用, 使换向变坏, 在电刷下会产生火花。当电刷不在几何中性线上时, 会产生直轴电枢反应, 根据电刷移动的方向不同, 将产生去磁作用或增磁作用。

(3) 在直流发电机中, 输入的是机械功率, 输出的是电功率, 其能量平衡方程为

$$P_1 - p_{\Omega} - p_{Fe} - p_{\Delta} = P_e$$

$$P_e - p_{Cu_a} - p_{Cu_f} = P_2$$

式中: 对于他励发电机,  $p_{Cu_f}$  应包含在输入功率  $P_1$  之中; 对于并励发电机,  $p_{Cu_f}$  应包含在电磁功率  $P_e$  之中。

(4) 在直流电动机中, 输入的是电功率, 输出的是机械功率, 其能量

平衡方程为

$$P_1 - p_{\text{Cua}} - p_{\text{Cuf}} = P_e$$

$$P_e - p_{\Omega} - p_{\text{Fe}} - p_{\Delta} = P_2$$

要注意区分发电机和电动机在能量传递过程中各种损耗的位置。

(5) 换向是直流电机运行的特殊问题。根据换向元件中电流改变方向的时间,换向可分为直线换向、延迟换向和超越换向等三种。希望电机能够直线换向,这是一种理想的换向,但在实际中很难做到。由于电枢元件中存在电感电动势等,一般会出现延迟换向,此时在电刷的后沿会产生火花;对于有补偿绕组的电机,当补偿过度时会出现超越换向,此时在电刷的前沿产生火花。总之,换向不良会在电刷下出现火花,产生的主要原因有电磁方面的、机械方面的和电化学方面的。加装换向极是改善换向的有效方法,实际中换向极绕组与电枢绕组串联,换向极磁路不饱和,其磁动势方向与交轴电枢磁动势方向相反,只要补偿适当,便能达到或接近直线换向的目的。

(6) 直流电机在计算时应注意以下问题。

① 磁化曲线是在一定的转速( $n'$ )下测得的,实际使用时的转速必须与之一致,若不一致,则必须进行折算。直流电动机在实际计算时往往转速为未知量,此时磁化曲线  $E_0 = f(I_{f0})$  可以通过  $C_e \Phi = \frac{E_0}{n}$  化成  $C_e \Phi = f(I_{f0})$  的形式使用。

② 磁化曲线又称空载特性,感应电动势  $E_s$  即空载电压  $U_0$ ,其对应的励磁电流  $I_{f0}$  是指空载时励磁绕组中的电流,也称有效励磁电流;负载时,考虑到电枢反应的去磁作用,在复励电机中还有串励绕组产生的磁动势,因此  $I_{f0}$  可通过磁动势平衡方程式求得。

并励、他励电机:  $N_f I_{f0} = N_f I_f - F_{ad}$

积复励电机:  $N_f I_{f0} = N_f I_f + N_s I_a - F_{ad}$

差复励电机:  $N_f I_{f0} = N_f I_f - N_s I_a - F_{ad}$

以上三式也可以用励磁电流表示为

$$I_{f0} = I_f - \Delta I_f$$

式中:  $\Delta I_f$  为电枢反应和串励绕组的等效去磁电流。

## 3.2 习题详解

3-1 直流电机有哪些励磁方式?

答 直流电机的励磁方式可分为他励、并励、串励、复励四种。

3-2 计算下列电枢绕组的节距,并绘出绕组展开图和电路图:

(1) 右行单叠短距绕组,  $2p = 4, Q_u = S = K = 22$ ;

(2) 左行单波绕组,  $2p = 6, Q_u = S = K = 22$ 。

解 (1) 右行单叠短距绕组。

合成节距  $y$  和换向片节距  $y_c$  为

$$y = y_c = 1$$

由于采用短距绕组,故第一节距为

$$y_1 = \frac{Q_u}{2p} - \epsilon = \frac{22}{4} - \frac{2}{4} = 5$$

第二节距为

$$y_2 = y_1 - y = 5 - 1 = 4$$

根据已经确定的各个节距,即可画出电枢绕组的展开图,如图 3-1 所示。

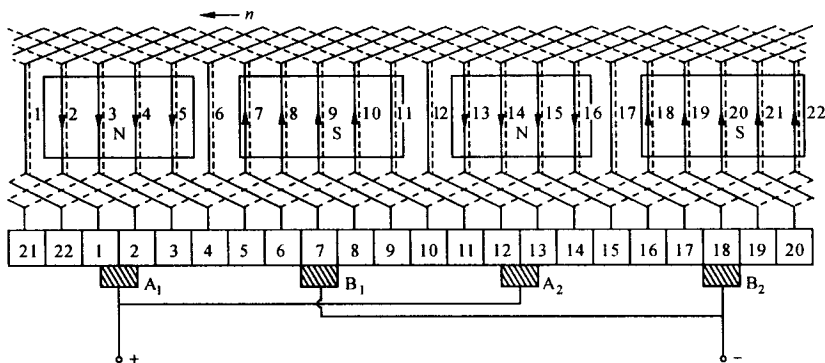


图 3-1 单叠绕组展开图( $2p = 4, S = K = Q_u = 22$ )

对应于图 3-1 所示瞬间,电枢绕组的电路图如图 3-2 所示。

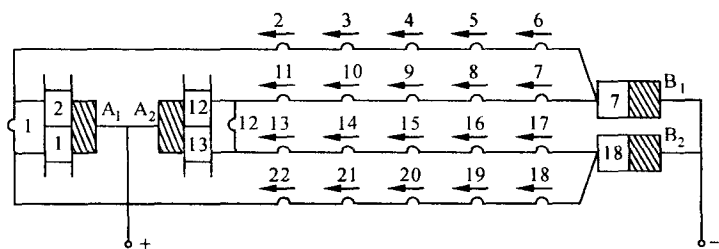


图 3-2 图 3-1 所示瞬间电枢绕组的电路图

(2) 左行单波绕组。

由于是左行绕组,故有  $py_c = K - 1$ ,即

$$y_c = \frac{K-1}{p} = \frac{22-1}{3} = 7$$

第一节距为

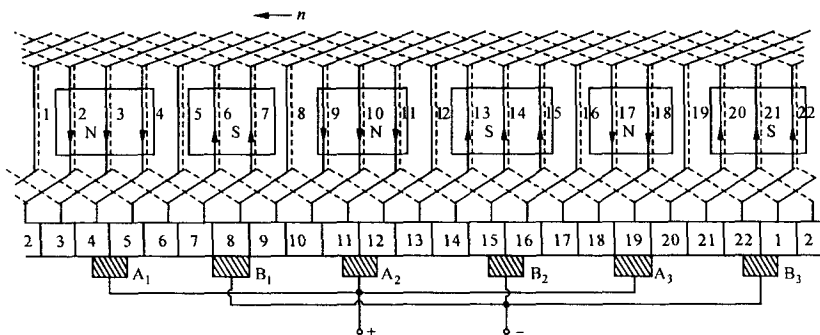
$$y_1 = \frac{Q_u}{2p} \pm \epsilon = \frac{22}{6} + \frac{2}{6} = 4$$

第二节距为

$$y_2 = y - y_1 = y_c - y_1 = 7 - 4 = 3$$

其联结规律为:  $1 \rightarrow 8 \rightarrow 15 \rightarrow 22 \rightarrow 7 \rightarrow 14 \rightarrow 21 \rightarrow 6 \rightarrow 13 \rightarrow 20 \rightarrow 5 \rightarrow 12 \rightarrow 19 \rightarrow 4 \rightarrow 11 \rightarrow 18 \rightarrow 3 \rightarrow 10 \rightarrow 17 \rightarrow 2 \rightarrow 9 \rightarrow 16 \rightarrow 1$  (闭合)。

其绕组展开图如图 3-3 所示。

图 3-3 单波绕组展开图 ( $2p = 6, S = K = Q_u = 22$ )

对应于图 3-3 所示瞬间,电枢绕组的电路图如图 3-4 所示。

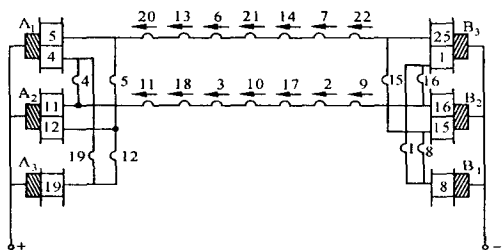


图 3-4 图 3-3 所示瞬间电枢绕组的电路图

3-3 在换向器上电刷正常应当放置在什么位置?为什么?

答 电刷在正常情况下应放置在换向器的几何中性线上(即当元件端接对称时,主磁极中心线的垂线上),其原因有:

(1) 主磁极产生的磁密在该位置为零,被电刷短路的元件中不会产生感应电动势,也不会产生环流;

(2) 此时电枢绕组的合成磁动势最大,电磁转矩也最大;

(3) 电机工作时电枢反应磁动势为交轴磁动势,不计饱和时,电枢反应磁场对主磁场的大小没有影响。

3-4 如果一台  $p$  对极的单叠绕组,其电枢电阻为  $R$ ,问用同等数目的同样元件接成单波绕组时,电枢电阻应为多少?

解 设单叠绕组时支路电阻为  $R_1$ ,考虑到并联支路数  $2a = 2p$ ,故有

$$R = \frac{R_1}{2a} = \frac{R_1}{2p}$$

即

$$R_1 = 2pR$$

对单波绕组而言,由于并联支路数  $2a = 2$ ,故每条支路的电阻为

$$R_{\text{波支}} = pR_1 = 2p^2R$$

因此

$$R_{\text{波}} = \frac{R_{\text{波支}}}{2a} = \frac{2p^2R}{2} = p^2R$$

3-5 有一台四极直流发电机,电枢为单叠绕组,原为 4 组电刷,现取去相邻两组电刷,问发电机的端电压及允许通过的电枢电流会发生什么变化?

答 由于是四极单叠绕组,内部应有 4 条支路并联,各支路电压相

等,电流也相等;当去掉相邻两组电刷时,相当于去掉了两条并联支路,仍有两条支路可以工作,因此发电机的端电压不变,但电枢绕组允许通过的电流要减小。设原来每条支路电流为  $i_a$ , 4 条支路并联总电流为  $4i_a$ ; 现两条支路并联,由于一条支路电阻为另一条支路电阻的 3 倍,故该支路的电流为另一支路电流的  $1/3$  (发电机的端电压不变),因此两条支路并联的总电流为  $i_a + \frac{1}{3}i_a = \frac{4}{3}i_a$ , 现在的电流与原来的电流之比为  $\frac{\frac{4}{3}i_a}{4i_a} = \frac{1}{3}$ , 即电流变成了原来的  $\frac{1}{3}$ 。

**3-6** 在直流发电机中,若电刷顺电枢旋转方向移动了一个角度,则电枢反应的性质是怎样的?若电刷逆电枢旋转方向移动一个角度,则电枢反应的性质又是怎样的?如果是电动机,在这两种情况下,电枢反应的性质将是怎样的?

**答** (1) 在直流发电机中,当电刷顺电枢旋转方向移动一个角度时,电枢反应的性质是:

- ① 使主磁场发生畸变;
- ② 具有去磁作用使主磁场减弱。

当电刷逆电枢旋转方向移动一个角度时,电枢反应的性质是:

- ① 使主磁场发生畸变;
- ② 具有增磁作用使主磁场增强。

(2) 在直流电动机中,当电刷顺电枢旋转方向移动一个角度时,电枢反应的性质是:

- ① 使主磁场发生畸变;
- ② 具有增磁作用使主磁场增强。

当电刷逆电枢旋转方向移动一个角度时,电枢反应的性质是:

- ① 使主磁场发生畸变;
- ② 具有去磁作用使主磁场减弱。

**3-7** 直流电机电枢绕组元件内的电动势和电流是直流的还是交流的?为什么在稳态电压方程中不出现元件本身的电感电动势?

**答** 电枢绕组元件内的电动势和电流都是交流的。因为当电枢旋

转时,绕组元件要依次切割N、S磁极,由于在N、S极下所产生的感应电动势的方向不同,相应地,电流的方向也不同,当电枢连续旋转时,便会在绕组元件内产生交变的电动势和电流。

在稳态时可认为通过元件的电流的大小基本是恒定的,再考虑到元件的电感量较小,因此元件本身所产生的电感电动势可以忽略不计,故在稳态电压方程中不予考虑。

### 3-8 直流电机的电磁功率等于什么?

**答** 电磁功率是指能量在相互转换过程中电能转换为机械能或机械能转换为电能的那部分转换功率,在数值上  $P_e = E_a I_a = T_e \Omega$ 。

**3-9** 有一台四极、82 kW、230 V、970 r/min 的他励直流发电机,电枢上共有 123 个元件,每个元件为一匝,支路数  $2a_{\Sigma} = 2$ 。如果每极的合成磁通等于空载额定转速下具有额定电压时每极的磁通,试计算当发电机输出额定电流时的电磁转矩。

**解** 根据题意  $U_N = E_a = C_e \Phi n_N$

所以

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{U_N}{C_e n_N} = \frac{U_N}{\frac{pZ_a}{60a_{\Sigma}} n_N} \\ &= \frac{230}{\frac{2 \times 123}{60 \times 1} \times 970} \text{ Wb} = 0.05783 \text{ Wb}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_e &= C_T \Phi I_a = \frac{pZ_a}{2\pi a_{\Sigma}} \Phi \frac{P_N}{U_N} \\ &= \frac{2 \times 123}{2\pi \times 1} \times 0.05783 \times \frac{82 \times 10^3}{230} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 807.2 \text{ N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

**3-10** 同一台既有并励、又有串励绕组的直流发电机,在恒速条件下,将它作为他励、并励、积复励时,比较电压调整率的大小。

**答** 电压调整率,反映了从空载到满载时发电机端电压下降的幅度的大小。

在他励发电机中引起端电压  $U$  下降的原因有两点:

① 当电枢电流  $I_a$  增大时,电枢绕组压降  $I_a R_a$  增大,引起端电压  $U$  下降;

② 当电枢电流  $I_a$  增大时, 电枢反应增大, 使主磁通  $\Phi$  减小, 电枢电动势  $E_a$  减小, 端电压  $U$  进一步减小, 其电压调整率大约为  $5\% \sim 10\%$ 。

在并励发电机中引起端电压下降的原因有三点: 前两点与他励相同, 另一点是由于端电压  $U$  下降, 引起励磁电流  $I_f$  减小, 主磁通  $\Phi$  下降, 电枢电动势  $E_a$  下降, 则端电压进一步下降, 其电压调整率约为  $20\%$  左右。

而在积复励发电机中, 并励绕组起主要作用, 它使发电机在空载时达到额定电压, 串励绕组主要是用来补偿负载时电枢反应的去磁作用和电枢回路的电阻压降, 由此可知积复励的电压调整率最小。

**3-11** 一台他励发电机的转速提高  $20\%$ , 空载电压会提高多少(设励磁电流保持不变)? 若为并励发电机, 则电压升高的百分值比他励发电机多还是少(设励磁电阻不变)?

答 空载电压

$$U_0 = E_a = C_e \Phi n$$

对于他励发电机, 由于励磁电流  $I_f$  不变, 主磁通  $\Phi$  不变, 由上式可知, 当转速  $n$  提高  $20\%$  时,  $U_0$  也会提高  $20\%$ 。

对于并励发电机, 当转速  $n$  提高  $20\%$  时, 若主磁通  $\Phi$  不变, 则空载电压会提高  $20\%$ 。实际上当  $U_0$  提高时, 励磁电阻不变, 会使励磁电流  $I_f$  增大, 主磁通  $\Phi$  也增大, 由上式可知,  $U_0$  会进一步提高, 因此并励发电机电压升高的百分值要大于他励发电机。

**3-12** 一台他励直流发电机的额定电压为  $230\text{ V}$ , 额定电流为  $10\text{ A}$ , 额定转速为  $1000\text{ r/min}$ , 电枢总电阻  $R_a = 1.5\ \Omega$ , 励磁绕组电阻  $R_f = 88\ \Omega$ 。已知在  $750\text{ r/min}$  时的空载特性如下表所示。

$I_f/\text{A}$	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3.0	3.6	4.4	5.2
$E_0/\text{V}$	33	78	120	150	176	194	206	225	240

试求:

- (1) 额定转速、励磁电流为  $2.5\text{ A}$  时, 空载电压为多少?
- (2) 若转速为  $900\text{ r/min}$ , 空载电压为多少?
- (3) 满载时电磁功率为多少?



解 (1) 在 750 r/min,  $I_f = 2.5$  A 时的空载特性为

$$U'_0 = E_s = C_e \Phi n$$

$$\text{即 } C_e \Phi = \frac{U'_0}{n} = \frac{176}{750} \text{ V/(r} \cdot \text{min}^{-1}) = 0.2347 \text{ V/(r} \cdot \text{min}^{-1})$$

所以在  $n_N = 1000$  r/min,  $I_f = 2.5$  A 时的空载电压

$$U_0 = C_e \Phi n_N = 0.2347 \times 1000 \text{ V} = 234.7 \text{ V}$$

(2) 其他条件不变, 当转速降为 900 r/min 时的空载电压

$$U_0 = C_e \Phi n = 0.2347 \times 900 \text{ V} = 211.23 \text{ V}$$

(3) 因为  $U_N = E_s - I_a R_a = E_s - I_N R_a$

$$\begin{aligned} \text{所以 } E_s &= U_N + I_N R_a \\ &= (230 + 10 \times 1.5) \text{ V} = 245 \text{ V} \\ P_e &= E_s I_a = E_s I_N \\ &= 245 \times 10 \text{ W} = 2.45 \text{ kW} \end{aligned}$$

**3-13** 有一台四极、82 kW、230 V、970 r/min 的并励发电机, 电枢电阻  $R_{a(75^\circ\text{C})} = 0.0259 \Omega$ , 励磁绕组总电阻  $R_{f(75^\circ\text{C})} = 22.8 \Omega$ , 额定负载时并励回路中串入  $3.5 \Omega$  的调节电阻, 电刷压降为 2 V, 铁耗和机械损耗共 2.5 kW, 杂散损耗为额定功率的 0.5%, 试求额定负载时发电机的输入功率、电磁功率和效率。

解 由于是并励发电机, 故

$$\begin{aligned} I_a &= I_N + I_f = \frac{P_N}{U_N} + \frac{U_N}{R_f} \\ &= \left( \frac{82 \times 10^3}{230} + \frac{230}{22.8 + 3.5} \right) \text{ A} = 365.27 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 + \sum p \\ &= P_N + I_a^2 R_{a(75^\circ\text{C})} + 2\Delta U_s I_a + I_f^2 (R_{f(75^\circ\text{C})} + R) + p_{Fe} + p_{\Omega} + p_{\Delta} \\ &= \left[ 82 \times 10^3 + 365.27^2 \times 0.0259 + 2 \times 365.27 + \left( \frac{230}{22.8 + 3.5} \right)^2 \times \right. \\ &\quad \left. (22.8 + 3.5) + 2.5 \times 10^3 + 82 \times 10^3 \times 0.5\% \right] \text{ W} \\ &= 91.108 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$E_s = U_N + I_a R_{a(75^\circ\text{C})} + 2\Delta U_s$$

$$= (230 + 365.27 \times 0.0259 + 2) \text{ V} = 241.46 \text{ V}$$

$$P_c = E_s I_a = 241.46 \times 365.27 \text{ W}$$

$$= 88.198 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{82 \times 10^3}{91.198 \times 10^3} \times 100\% = 90\%$$

**3-14** 有一台 100 kW、230 V 的并励发电机，励磁绕组每极有 1000 匝，在额定转速下产生空载额定电压需励磁电流 7 A，额定电流时需 9.4 A 的励磁电流才能达到同样的端电压。今欲将该发电机改为平复励发电机，问每极应加多少匝串励绕组？

解 
$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{100 \times 10^3}{230} \text{ A} = 434.78 \text{ A}$$

空载时为产生额定电压所需的励磁磁动势为

$$7 \times 1000 \text{ A} = 7000 \text{ A}$$

负载时为产生额定电压所需的励磁磁动势为

$$9.4 \times 1000 \text{ A} = 9400 \text{ A}$$

说明负载时有  $(9400 - 7000) \text{ A} = 2400 \text{ A}$  的去磁作用，现用串励绕组将其改成平复励，则串励绕组应产生 2400 A 的励磁磁动势对去磁作用进行补偿，因此所需的匝数为

$$N_c = \frac{2400}{434.78} = 6$$

**3-15** 一台并励直流电动机在正转时为某一转速，如将它停车，仅改变励磁电流的方向后重新启动运转，发现反转时的转速与原来不同，是什么原因？

答 正转停车后直流电动机的铁心有剩磁，因此它仍保留着原来的一部分磁场；而当改变励磁电流方向后，励磁绕组中新产生的磁场的方向与剩磁方向相反，这就使总磁通有所减小，根据  $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$  可知，当其他参数不变时，转速  $n$  有所增大。

另外对没有换向极的直流电动机而言，为减小电刷下的火花，已将电刷逆电枢旋转方向移动了一个  $\beta$  角；而其反转后，电刷相当于顺电枢旋转方向移动了一个  $\beta$  角，故必然会使电枢反应增强，不但会在电刷下

产生强烈的火花,同时去磁作用增强,使主磁通发生变化,因此转速 $n$ 也必然发生变化。

**3-16** 有一台 17 kW、220 V 的并励直流电动机,电枢总电阻为  $0.1\ \Omega$ ,在额定电压下电枢电流为 100 A,转速为 1450 r/min,并励绕组与一变阻器串联使励磁电流为 4.3 A,  $2\Delta U_s = 2\text{ V}$ 。当变阻器短路时,励磁电流为 9 A,转速降低到 850 r/min,电动机带有恒转矩负载,不计机械损耗和铁耗,试计算:

- (1) 励磁绕组的电阻和变阻器电阻;
- (2) 电磁转矩;
- (3) 变阻器短路后,电枢电流的稳态值。

**解** (1) 励磁绕组的总电阻

$$R_a = \frac{U_N}{I_f} = \frac{220}{4.3}\ \Omega = 51.16\ \Omega$$

变阻器短路后,励磁回路只剩下其本身的电阻

$$R_f = \frac{U_N}{I_f'} = \frac{220}{9}\ \Omega = 24.44\ \Omega$$

所以变阻器的电阻

$$R_{in} = R_a - R_f = (51.16 - 24.44)\ \Omega = 26.72\ \Omega$$

- (2) 当励磁电流为 4.3 A 时,电枢回路的电动势

$$\begin{aligned} E_a &= U_N - I_a R_a - 2\Delta U_s = (220 - 100 \times 0.1 - 2)\text{ V} \\ &= 208\text{ V} \end{aligned}$$

电磁转矩

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{E_a I_a}{\Omega} = \frac{E_a I_a}{2\pi n/60} = \frac{208 \times 100}{2\pi \frac{1450}{60}}\text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 136.98\text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

- (3) 由于为恒转矩负载,故当励磁电流增大至 9 A,转速降至 850 r/min 时,  $T_e$  仍为 136.98 N·m,由此可得

$$T_e' = \frac{E_a' I_a'}{\Omega'} = \frac{(U_N - I_a' R_a) I_a'}{2\pi \frac{n}{60}}$$

$$= \frac{(220 - 0.1I'_a - 2\Delta U_s)I'_a}{2\pi \frac{850}{60}}$$

$$= 136.98 \text{ N} \cdot \text{m}$$

解之可得

$$I'_a = 57.44 \text{ A}$$

$$I''_a = 2122.56 \text{ A (不符题意, 舍去)}$$

**3-17** 有一台 17 kW、220 V 的串励直流电动机, 串励绕组电阻为  $0.12 \Omega$ , 电枢总电阻为  $0.2 \Omega$ , 在额定电压下运行时, 电动机电枢电流为 65 A, 转速为 670 r/min。试确定负载增大而使电枢电流增大为 75 A 时, 电动机的转速和电磁转矩(磁路设为线性)。

**解** 在额定情况下运行时, 有

$$C_e \Phi_N = \frac{E_a}{n_N} = \frac{U_N - I_a(R_t + R_a)}{n_N}$$

$$= \frac{220 - 65 \times (0.12 + 0.2)}{670} \text{ V/(r} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$= 0.2973 \text{ V/(r} \cdot \text{min}^{-1})$$

负载增大后串励电动机的  $C_e \Phi'$  为

$$C_e \Phi' = C_e \Phi \frac{I'_a}{I_a} = 0.2973 \times \frac{75}{65} \text{ V/(r} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$= 0.3431 \text{ V/(r} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$n_2 = \frac{E'_a}{C_e \Phi'} = \frac{U_N - I'_a(R_t + R_a)}{C_e \Phi'}$$

$$= \frac{220 - 75 \times (0.12 + 0.2)}{0.3431} \text{ r/min} = 571.3 \text{ r/min}$$

$$T_e = \frac{E'_a I'_a}{\Omega} = \frac{[U_N - I'_a(R_t + R_a)] I'_a}{2\pi \frac{n_2}{60}}$$

$$= \frac{[220 - 75 \times (0.12 + 0.2)] \times 75}{2\pi \times \frac{571.3}{60}} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$= 245.71 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**3-18** 有一台 96 kW 的并励直流电动机, 额定电压为 440 V, 额定

电流为 255 A, 额定励磁电流为 5 A, 额定转速为 500 r/min, 电枢电阻为 0.078  $\Omega$ 。不计电枢反应, 试求:

- (1) 电动机的额定输出转矩;
- (2) 额定电流时的电磁转矩;
- (3) 电动机的空载转速。

$$\begin{aligned} \text{解 (1)} \quad T_2 &= \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_N}{2\pi \frac{n_N}{60}} = \frac{96 \times 10^3}{2\pi \times \frac{500}{60}} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 1833.5 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (2) \quad E_a &= U_N - I_a R_a = U_N - (I_N - I_f) R_a \\ &= [440 - (255 - 5) \times 0.078] \text{ V} = 420.5 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{E_a I_a}{\Omega} = \frac{E_a (I_N - I_f)}{2\pi \frac{n_N}{60}} \\ &= \frac{420.5 \times (255 - 5)}{2\pi \times \frac{500}{60}} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 2007.74 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$(3) \text{ 因为 } E_a = C_e \Phi n_N$$

$$\text{所以 } C_e \Phi = \frac{E_a}{n_N} = \frac{420.5}{500} \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1}) = 0.841 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi} = \frac{440}{0.841} (\text{r}/\text{min}) = 523.19 \text{ r}/\text{min}$$

**3-19** 一台他励直流发电机, 如果改变它的转向, 问换向极的极性是否改变? 此时换向极是否仍能改善换向性能?

**答** 如图 3-5 所示, 设主磁极的极性为上 N 下 S, 电枢逆时针方向转动, 根据右手定则可判断出电枢上半部分电动势、电流 (当外电路接通时) 方向向外, 下半部分向内。电枢反应磁场方向

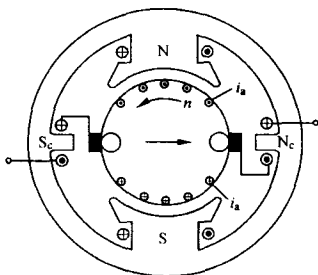


图 3-5 题 3-19 附图

由左向右,为抵消该磁场,换向极的极性应为左侧为  $S_c$  极,右侧为  $N_c$  极。

发电机转向改为顺时针方向,由于主磁场极性不变,故电枢导体中电动势、电流的方向也随之改变,电枢反应磁场的方向变成由右向左;由于换向极励磁线圈的接法不变,换向极绕组内电流的方向也随电枢绕组内电流方向的改变而改变(因为两者串联),故换向极的极性也发生变化,左侧为  $N_c$ ,右侧为  $S_c$ ;由于其方向仍与电枢反应磁场方向相反,故仍能改善换向性能。

### 3.3 经典题型

1. 某航空直流发电机,额定数据如下:  $P_N = 6 \text{ kW}$ ,  $U_N = 28 \text{ V}$ ,  $n_N = 6000 \text{ r/min}$ , 电枢电阻  $R_a = 0.02 \Omega$ , 并励绕组电阻  $R_f = 2.6 \Omega$ , 电刷压降  $2\Delta U_s = 2 \text{ V}$ , 空载损耗  $P_0 = 300 \text{ W}$ 。求:

(1) 额定负载下的电磁功率  $P_e$ ;

(2) 额定负载下的电磁转矩  $T_e$ ;

(3) 额定负载下的效率  $\eta$ 。

(西北工业大学研究生试题)

解 (1) 励磁电流  $I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{28}{2.6} \text{ A} = 10.77 \text{ A}$

送出的负载电流  $I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{6 \times 10^3}{28} \text{ A} = 214.3 \text{ A}$

电枢电流  $I_a = I_N + I_f$   
 $= (214.3 + 10.77) \text{ A} = 225.07 \text{ A}$

电枢电动势  $E_a = U_N + I_a R_a + 2\Delta U_s$   
 $= (28 + 225.07 \times 0.02 + 2) \text{ V} = 34.5 \text{ V}$

电磁功率  $P_e = E_a I_a = 34.5 \times 225.07 \text{ W} = 7765 \text{ W}$

(2) 电磁转矩

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{P_e \cdot 60}{2\pi n} = \frac{7765 \times 60}{2\pi \times 6000} \text{ N} \cdot \text{m} = 12.36 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(3) 额定运行下的总损耗

$$\begin{aligned}\sum p &= P_0 + I_a^2 R_a + 2\Delta U_s I_a + U_f I_f \\ &= (300 + 225.07^2 \times 0.02 + 2 \times 225.07 + 28 \times 10.77) \text{ W} \\ &= 2065 \text{ W}\end{aligned}$$

额定运行时的输入功率

$$P_1 = P_N + \sum p = (6000 + 2065) \text{ W} = 8065 \text{ W}$$

效率 
$$\eta = \frac{P_N}{P_1} = \frac{6000}{8065} = 0.744 = 74.4\%$$

2. 两台完全相同的并励直流电机,机械上用同一轴联在一起,并联结于 230 V 的电网上,轴上不带其他负载,在 1000 r/min 时,空载特性如右表所示。

$I_f/\text{A}$	1.3	1.4
$E_o/\text{V}$	186.67	195.83

现电机 A 的励磁电流为 1.4 A,电机 B 的为 1.3 A,电枢电路总电阻(包括电刷接触电阻)为  $0.1 \Omega$ ,转速为 1200 r/min,如忽略电枢反应的影响,试问:

(1) 哪一台为发电机?哪一台为电动机?

(2) 两台电机的总的机械损耗与铁耗是多少?

(3) 只调节励磁电流(如对调两台电机的励磁电流值)是否能改变两台电机的运行状态(保持转速不变)?

(4) 是否可以在 1200 r/min 下,两台电机都从电网吸收功率或向电网送出功率?

(武汉水利电力学院研究生试题)

解 (1) 由于电机 A 的励磁电流为 1.4 A,从 1000 r/min 时的空载特性上可得该转速下的电动势为 195.83 V,当转速为 1200 r/min 时,其电动势

$$E_{aA} = 195.83 \times \frac{1200}{1000} \text{ V} = 235 \text{ V}$$

同理可得电机 B 在转速为 1200 r/min 时的电动势

$$E_{aB} = 186.67 \times \frac{1200}{1000} \text{ V} = 224 \text{ V}$$

由于  $E_{aA} > U, E_{aB} < U$ , 故电机 A 为发电机, 电机 B 为电动机。

(2) 两台电机总的机械损耗和铁耗等于电动机的电磁功率减去发电机的电磁功率。

电动机的电枢电流

$$I_{aB} = \frac{U - E_{aB}}{R_a} = \frac{230 - 224}{0.1} \text{ A} = 60 \text{ A}$$

电磁功率

$$P_{eB} = E_{aB} I_{aB} = 224 \times 60 \text{ W} = 13440 \text{ W}$$

发电机的电枢电流

$$I_{aA} = \frac{E_{aA} - U}{R_a} = \frac{235 - 230}{0.1} \text{ A} = 50 \text{ A}$$

电磁功率

$$P_{eA} = E_{aA} \cdot I_{aA} = 235 \times 50 \text{ W} = 11750 \text{ W}$$

总的机械损耗和铁耗

$$P_{eB} - P_{eA} = (13440 - 11750) \text{ W} = 1690 \text{ W}$$

(3) 要改变两台电机运行状态并保持转速不变, 应减小电机 A 的励磁电流, 同时增大电机 B 的励磁电流, 当两台电机的励磁电流相同时, 两台电机都是电动机, 若继续调节, 则电机 A 成为电动机, 电机 B 将成为发电机。

(4) 都可以通过从电网吸收电功率成为电动机, 但不能都成为发电机, 因为它们的轴是不与外部机械联结的。

3. 一台并励直流电动机:  $P_N = 6 \text{ kW}, U_N = 110 \text{ V}, I_N = 62 \text{ A}, n_N = 1470 \text{ r/min}, R_f = 140 \Omega$ , 电枢电路总电阻  $R_a = 0.15 \Omega$ , 电动机在额定运行时突然在电枢回路中串入  $0.5 \Omega$  电阻, 若不计电枢电路中的电感, 计算此瞬间的电枢电动势, 电枢电流和电磁转矩, 并求稳态转速(假定负载转矩不变)。

解 (1) 额定励磁电流

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{110}{140} \text{ A} = 0.786 \text{ A}$$



额定电枢电流

$$I_{aN} = I_N - I_f = (62 - 0.786) \text{ A} = 61.214 \text{ A}$$

额定电枢电动势

$$E_{aN} = U_N - I_{aN} R_a = (110 - 61.214 \times 0.15) \text{ V} = 100.82 \text{ V}$$

在电枢中串入电阻的瞬间,转速和磁通不变,即瞬间电枢电动势

$$E'_a = E_{aN} = 100.82 \text{ V}$$

(2) 电枢电流

$$I'_a = \frac{U_N - E'_a}{R_a + 0.5} = \frac{110 - 100.82}{0.15 + 0.5} \text{ A} = 14.123 \text{ A}$$

(3) 电磁转矩

$$T_N = 9.55 \times \frac{E_{aN} I_{aN}}{n_N} = 9.55 \times \frac{100.82 \times 61.214}{1470} \text{ N} \cdot \text{m} = 40.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T' = T_N \frac{I'_a}{I_{aN}} = 40.1 \times \frac{14.123}{61.214} \text{ N} \cdot \text{m} = 9.25 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(4) 稳态时,由于负载转矩不变,电磁转矩也不变,  $I_a = 61.214 \text{ A}$ , 所以电动势

$$\begin{aligned} E_a &= U_N - I_a (R_a + 0.5) \\ &= [110 - 61.214 \times (0.15 + 0.5)] \text{ V} = 70.2 \text{ V} \end{aligned}$$

因转速和电动势成正比,故有

$$n = n_N \frac{E_a}{E_{aN}} = 1470 \times \frac{70.2}{100.82} \text{ r/min} = 1023.5 \text{ r/min}$$

4. 如上题之电机在额定情况下运行时,如将电源电压突然降至 100V,试求上题之各项的解答(假设磁路线性)。

解 (1) 电压下降,励磁电流就减小,磁通减小,所以电枢电动势下降为

$$E'_a = E_{aN} \frac{U}{U_N} = 100.82 \times \frac{100}{110} \text{ V} = 91.65 \text{ V}$$

(2) 电枢电流

$$I'_a = \frac{U - E'_a}{R_a} = \frac{100 - 91.65}{0.15} \text{ A} = 55.67 \text{ A}$$

(3) 电磁转矩

$$\begin{aligned}
 T' &= T_N \frac{I'_a \Phi'}{I_{aN} \Phi_N} = T_N \frac{I'_a U}{I_{aN} U_N} \\
 &= 40.1 \times \frac{55.67}{61.214} \times \frac{100}{110} \text{ N} \cdot \text{m} \\
 &= 33.15 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

(4) 稳态时电枢电流

$$I_a = I_{aN} \frac{\Phi_N}{\Phi} = 61.214 \times \frac{110}{100} \text{ A} = 67.3 \text{ A}$$

故

$$\begin{aligned}
 E_a &= U - I_a R_a \\
 &= (100 - 67.3 \times 0.15) \text{ V} = 89.9 \text{ V} \\
 n &= n_N \frac{E_a \Phi_N}{E_{aN} \Phi} = n_N \frac{E_a}{E_{aN}} \cdot \frac{U_N}{U} \\
 &= 1470 \times \frac{89.9}{100.82} \times \frac{110}{100} \text{ r/min} = 1442 \text{ r/min}
 \end{aligned}$$

5. 题3的电动机在额定情况下运行时,如调节  $I_f$  值,使磁通突然减小15%,试求题3中各项解答。

解 (1) 磁通减少15%时,电动势也减少15%,即

$$E'_a = 0.85 E_{aN} = 0.85 \times 100.82 \text{ V} = 85.7 \text{ V}$$

(2) 电枢电流

$$I'_a = \frac{U_N - E'_a}{R_a} = \frac{110 - 85.7}{0.15} \text{ A} = 162 \text{ A}$$

(3) 电磁转矩

$$\begin{aligned}
 T' &= T_N \frac{I'_a \Phi}{I_{aN} \Phi_N} = 40.1 \times \frac{162}{61.214} \times 0.85 \text{ N} \cdot \text{m} \\
 &= 90.2 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

(4) 由于负载转矩不变,所以稳态时电枢电流

$$I_a = \frac{I_{aN} \Phi_N}{\Phi} = 61.214 \times \frac{1}{0.85} \text{ A} = 72 \text{ A}$$

则  $E_a = U_N - I_a R_a = (110 - 72 \times 0.15) \text{ V} = 99.2 \text{ V}$

$$n = n_N \frac{E_a \Phi_N}{E_{aN} \Phi} = 1470 \times \frac{99.2}{100.82} \times \frac{1}{0.85} \text{ r/min}$$

$$= 1701.6 \text{ r/min}$$

6. 直流并励电动机的额定数据:  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $I_N = 40 \text{ A}$ , 电枢回路电阻  $R_a = 0.4 \Omega$ , 电刷电压降  $2\Delta U_s = 2 \text{ V}$ , 励磁回路电阻  $R_f = 190 \Omega$ , 额定电枢反应去磁等效励磁电流  $\Delta I_f = 0.05 \text{ A}$ , 空载损耗  $P_0 = 300 \text{ W}$ 。转速为  $1000 \text{ r/min}$  时测得空载特性如下表所示, 试求:

(1) 空载转速、额定转速和转速变化率;

(2) 额定电磁转矩和效率。

$I_{f0}/\text{A}$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3
$E_0/\text{V}$	83.5	120	150	182	191	198.6	204

(东南大学研究生试题)

解 将空载特性  $C_e \Phi = \frac{E_0}{n}$  化成  $C_e \Phi = f(I_{f0})$  的形式, 其数据如下表所示。

$I_{f0}/\text{A}$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3
$C_e \Phi / (\text{V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1}))$	0.0835	0.12	0.15	0.182	0.191	0.1986	0.204

(1) 空载时的励磁电流

$$I_{f0} = \frac{U}{R_f} = \frac{220}{190} \text{ A} = 1.158 \text{ A}$$

由空载特性用插入法求得

$$C_e \Phi_0 = \left( 0.191 + \frac{1.158 - 1.1}{1.2 - 1.1} \times (0.1986 - 0.191) \right) \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$= 0.1954 (\text{V}/\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

空载转速

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi_0} = \frac{220}{0.1954} \text{ r/min} = 1125.9 \text{ r/min}$$

满载时有效励磁电流

$$I_f = I_{f0} - \Delta I_f = (1.158 - 0.05) \text{ A} = 1.108 \text{ A}$$

$$C_e \Phi = \left( 0.191 + \frac{1.108 - 1.1}{1.2 - 1.1} \times (0.1986 - 0.191) \right) \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$= 0.1916 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

满载电动势

$$E_{sN} = U - I_a R_a - 2\Delta U_s$$

$$= [220 - (40 - 1.158) \times 0.4 - 2] \text{ V} = 202.5 \text{ V}$$

满载时转速

$$n_N = \frac{E_{sN}}{C_e \Phi} = \frac{202.5}{0.1916} \text{ r/min} = 1056.9 \text{ r/min}$$

$$\text{转速变化率 } \Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\%$$

$$= \frac{1125.9 - 1056.9}{1056.9} \times 100\% = 6.53\%$$

(2) 额定电磁转矩

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{E_a I_a}{2\pi n_N / 60} = \frac{202.5 \times (40 - 1.158)}{2\pi \times 1056.9 / 60} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$= 71.07 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_e - P_0}{U_N I_N} \times 100\%$$

$$= \frac{202.5 \times (40 - 1.158) - 300}{220 \times 40} \times 100\%$$

$$= 85.97\%$$

7. 一台并励直流电机, 接 220 V 的电压, 极对数  $p = 2$ , 电枢总导体数  $N = 322$ , 转速  $n = 1580 \text{ r/min}$ , 并联支路数  $a = 1$ , 每极磁通  $\Phi = 0.012 \text{ Wb}$ , 电枢回路总电阻 (含电刷接触电阻)  $R_a = 0.21 \Omega$ , 铁耗  $p_{Fe} = 380 \text{ W}$ , 机械损耗  $p_n = 200 \text{ W}$ , 不计电枢反应的影响, 求:

(1) 该电机是发电机状态还是电动机状态?

(2) 输入功率;

(3) 输出功率。

(东南大学研究生试题)

解 (1)  $E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = \frac{2 \times 322}{60 \times 1} \times 0.012 \times 1580 \text{ V} = 203.5 \text{ V}$

由于  $E_a < U = 220 \text{ V}$ , 故为电动机状态。

(2)  $I_a = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{220 - 203.5}{0.21} \text{ A} = 78.57 \text{ A}$

电磁功率  $P_e = E_a I_a = 203.5 \times 78.57 \text{ W} = 15989 \text{ W}$

输入功率  $P_1 = P_e + p_{\text{Cua}} = P_e + I_a^2 R_a$   
 $= (15989 + 78.57^2 \times 0.21) \text{ W} = 17285.4 \text{ W}$

(3) 输出功率

$P_2 = P_e - p_{\text{Fe}} - p_{\Omega} = (15989 - 380 - 200) \text{ W}$   
 $= 15409 \text{ W}$

8. 一台直流电动机在额定情况下调速, 若负载转矩不变, 试问下列情况下额定转速和电枢电流将如何变化?

(1) 励磁电流减小 10%, 端电压不变;

(2) 端电压下降 10%, 励磁电流不变。

(东南大学研究生试题)

答 可用公式  $T_e = C_T \Phi I_a$  ①

和公式  $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$  ②

来进行分析。

(1) 励磁电流减小 10%,  $\Phi$  约减小 10%, 由于负载转矩不变,  $T_e$  也不变, 由公式 ① 可知,  $I_a$  约增加 10%; 由公式 ② 可知, 若只考虑  $\Phi$  的减小,  $n$  应上升约 10%, 但由于  $I_a$  增加, 使  $U - I_a R_a$  有所减小, 这就使  $n$  的上升幅度小于 10%。

(2) 由于  $I_f$  不变,  $\Phi$  不变, 同时考虑到  $T_e$  不变, 由公式 ① 可知,  $I_a$  不变; 由公式 ② 可知, 由于  $U$  下降 10%, 其他不变,  $n$  约下降 10%。

9. 一台复励直流电动机, 额定:  $I_N = 250 \text{ A}$ ,  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $n_N = 1500 \text{ r/min}$ , 电枢回路电阻  $R_a = 0.024 \Omega$ , 电刷接触电压降  $2\Delta U_s = 2 \text{ V}$ , 励磁回路电阻  $R_f = 96.8 \Omega$ , 铁耗  $p_{\text{Fe}} = 0.8 \text{ kW}$ , 机械损耗和杂散损耗  $p_{\Omega} + p_{\Delta} = 1.5 \text{ kW}$ 。试求:

(1) 额定输出功率和输出转矩;

(2) 额定效率。

(东南大学研究生试题)

$$\text{解(1)} E_s = U_N - I_s R_s - 2\Delta U_s = U_N - (I_N - I_f) R_s - 2\Delta U_s$$

$$= \left[ 220 - \left( 250 - \frac{220}{96.8} \right) \times 0.024 - 2 \right] \text{V}$$

$$= 212.05 \text{ V}$$

$$I_s = I_N - I_f = \left( 250 - \frac{220}{96.8} \right) \text{ A} = 247.73 \text{ A}$$

$$P_{\bar{e}} = E_s I_s = 212.05 \times 247.73 \text{ W} = 52531.1 \text{ W}$$

$$P_{\bar{e}} = P_e - p_{Fe} - p_n - p_{\Delta}$$

$$= (52531.1 - 800 - 1500) \text{ W}$$

$$= 50231.1 \text{ W}$$

$$T_{\bar{e}} = \frac{P_2}{\Omega} = 9.55 \frac{P_2}{n_N} = 9.55 \times \frac{50231.1}{1500} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$= 319.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$(2) P_1 = P_e + p_{\text{Cua}} + p_{\text{Cuf}} + 2\Delta U_s I_s$$

$$= P_e + I_s^2 R_s + \frac{U_N}{R_f} + 2\Delta U_s I_s$$

$$= (52531.1 + 247.73^2 \times 0.024 + \frac{220^2}{96.8} + 247.73 \times 2) \text{ W}$$

$$= 55000 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{50231.1}{55000} \times 100\% = 91.33\%$$

### 3.4 补充习题及解答

#### 3.4.1 补充习题

1. 有一台四极单波绕组的直流电机,问:

(1) 只用相邻的两只电刷,电机是否能够工作?对感应电动势有何影响?对电机的容量有何影响?如果仅去一只电刷,电机剩下三只电刷是否还能工作?

(2) 若只有一个元件断线,问对电机的电动势和电流有何影响?

(3) 若只用相对着的两只电刷,电机可以运行吗?

2. 设电机的导体数和其他条件都不变,若将其联结成单叠绕组和单波绕组,试比较这两种联结时感应电动势、电流和电机容量的大小。

3. 一台直流发电机,在励磁电流和电枢电流不变的条件下,若转速下降,则其铜损耗、铁损耗、机械损耗、电枢电动势、电磁功率、电磁转矩、输出功率、输入功率将分别如何变化?

4. 一台他励直流发电机,额定转速  $n_N = 1000 \text{ r/min}$ , 额定电压  $U_N = 230 \text{ V}$ , 额定电枢电流  $I_{aN} = 11 \text{ A}$ , 励磁电流  $I_f = 3.6 \text{ A}$ , 电枢总电阻  $R_a = 1 \Omega$ , 励磁绕组电阻  $R_f = 50 \Omega$ , 转速为  $760 \text{ r/min}$  时空载特性如下表所示。

$I_f/\text{A}$	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	2.6	3.0	3.6	4.4
$E_0/\text{V}$	35	80	123	155	180	183	198	210	230

当该发电机工作在额定转速时,求:

(1) 空载端电压的大小;

(2) 满载时的感应电动势;

(3) 若将此发电机改为并励发电机,则额定负载时励磁回路应串入多大的电阻?

(4) 若整个发电机的励磁绕组共有 780 匝,则满载时电枢反应的去磁磁动势为多少?

5. 一台他励直流发电机:  $P_N = 26 \text{ kW}$ ,  $U_N = 115 \text{ V}$ ,  $n_N = 950 \text{ r/min}$ , 额定励磁电流  $I_{fN} = 6.8 \text{ A}$ , 满载时的效率  $\eta_N = 87\%$ , 电枢电路总电阻  $R_a = 0.032 \Omega$ 。若将此发电机改作并励电动机运行,接在  $110 \text{ V}$  电源上,并保持励磁电流、电枢电流和效率不变。求:

(1) 电动机的额定功率和额定转速;

(2) 作发电机运行和电动机运行时的电磁转矩;

(3) 作电动机运行时从满载到空载的转速变化率(忽略电动机的空载电流和电枢反应)。

6. 启动直流电动机时,为什么必须在电枢回路中串电阻或降低电

源电压?

7. 一台长复励电动机:  $P_N = 100 \text{ kW}$ ,  $I_N = 500 \text{ A}$ ,  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $n_N = 1500 \text{ r/min}$ ,  $I_{fN} = 4.8 \text{ A}$ , 电枢绕组电阻  $R_a = 0.01 \Omega$ , 换向极绕组电阻  $R_K = 0.004 \Omega$ , 串励绕组电阻  $R_s = 0.001 \Omega$ ,  $p_{Fe} = 1.17 \text{ kW}$ ,  $p_n = 2.1 \text{ kW}$ , 附加损耗  $p_\Delta = 1 \text{ kW}$ 。假定铁耗与转速的 1.5 次方和磁通的平方成正比, 机械损耗与转速的 1.5 次方成正比, 附加损耗和电流的平方成正比。试求电动机在额定负载 ( $I_N$ ) 和半载 ( $I_N/2$ ) 时的效率 (励磁电流保持为  $I_{fN}$  值不变, 忽略电枢反应的影响)。

8. 一台并励直流电机并联于  $220 \text{ V}$  的直流电网上运行, 已知电机支路对数  $a = 1$ , 极对数  $p = 2$ , 电机总导体数  $Z = 360$ , 额定转速  $n_N = 1400 \text{ r/min}$ , 每极磁通  $\Phi = 1.2 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ , 电枢回路总电阻  $R_a = 0.21 \Omega$ , 励磁回路总电阻  $R_f = 122 \Omega$ , 铁损耗  $p_{fe} = 360 \text{ W}$ , 机械损耗  $p_n = 200 \text{ W}$ , 试求:

(1) 此时电机运行于发电机状态还是电动机状态?

(2) 电机的电磁转矩  $T_e$ ;

(3) 输入功率  $P_1$  和电机的效率  $\eta$ 。

9. 一台并励发电机数据如下:  $P_N = 82 \text{ kW}$ ,  $U_N = 230 \text{ V}$ ,  $n_N = 960 \text{ r/min}$ , 电枢回路总电阻  $R_a = 0.033 \Omega$  (包括电刷接触电阻), 励磁回路总电阻  $R_f = 33 \Omega$ , 今将此发电机作为电动机运行, 所加电压  $U = 220 \text{ V}$ , 若额定电枢电流仍与原先数据相同, 求:

(1) 电动机的转速 (设电枢在几何中性线上, 并且磁路不饱和);

(2) 当电动机空载运行时, 已知空载转矩  $T_0$  是额定电磁转矩  $T_e$  的  $1.2\%$ , 求电动机的转速。

10. 带换向极的并励发电机, 如果只改变并励绕组接法, 使其向反方向运动, 问换向情况有无变化?

11. 两台他励直流发电机并联运行, 它们的数据如下。

发电机 I:  $P_{IN} = 19 \text{ kW}$ ,  $U_{IN} = 230 \text{ V}$ ,  $n_{IN} = 960 \text{ r/min}$ , 电枢电路电阻  $R_{Ia} = 0.239 \Omega$ ,  $2\Delta U_s = 2 \text{ V}$ 。

发电机 II:  $P_{IIN} = 14 \text{ kW}$ ,  $U_{IIN} = 230 \text{ V}$ ,  $n_{IIN} = 960 \text{ r/min}$ , 电枢电路电阻  $R_{IIa} = 0.363 \Omega$ ,  $2\Delta U_s = 2 \text{ V}$ 。求:



(1) 当供给总负载功率  $P = 20 \text{ kW}$  时, 两台发电机间的负载分配和汇流排上的电压(忽略电枢反应, 两台发电机均工作在额定励磁电流下);

(2) 在不使任何一台发电机过载的情况下, 两台发电机可能供给的最大总负载功率。

12. 一台他励直流电动机, 额定电压  $U_N = 600 \text{ V}$ , 忽略各种损耗, 求:

(1) 当电枢电压为额定值, 负载转矩为额定值  $T_{2N} = 400 \text{ N} \cdot \text{m}$  不变时, 转速为  $1500 \text{ r/min}$ , 该电动机的额定电枢电流;

(2) 保持电枢电压为额定值不变, 采用弱磁调速使转速升高到  $3000 \text{ r/min}$ , 电动机此时能输出的最大转矩。

13. 有一台并励电动机, 额定数据如下:  $U_N = 500 \text{ V}$ ,  $I_N = 220 \text{ A}$ ,  $n_N = 700 \text{ r/min}$ ,  $\eta_N = 0.9$ , 采用电枢回路总电阻(包括电刷接触电阻)  $R_a = 0.05 \Omega$ 。采用电枢回路串电阻调速, 负载转矩保持额定值不变, 略去电枢反应的影响, 试求转速为  $600 \text{ r/min}$  时:

(1) 电枢回路附加电阻  $R_{ad}$ ;

(2) 附加电阻上的损耗和电动机的效率。

14. 有一并励电动机, 额定电压  $U_N = 220 \text{ V}$ , 额定电流  $I_N = 45 \text{ A}$ , 励磁电流  $I_{fN} = 1.2 \text{ A}$ , 额定转速  $n_N = 1000 \text{ r/min}$ , 电枢回路中电阻  $R_a = 0.6 \Omega$ , 电刷接触电压降  $2\Delta U_s = 2 \text{ V}$ 。略去电枢反应去磁作用, 额定转速时空载特性如下表所示。

$I_B / \text{A}$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3
$E_0 / \text{V}$	83.5	120	158	182	191	198.6	204

负载转矩及励磁回路电阻不变, 试求端电压为  $180 \text{ V}$  时:

(1) 输入电流;

(2) 负载转速和空载转速。

### 3.4.2 补充习题解答

1. 答 (1) 只用相邻两只电刷, 电机能工作, 对感应电动势和电机

容量均无影响。仅取去一只电刷时,因为仍为两条支路并联,所以电机还能工作,对电动势和电机容量均无影响。

(2) 若只有一个元件断线,此时仅断开了一条支路,对另一条支路无影响,故对电动势也无影响,由于仅剩下一条支路有电流,电流为原来的  $1/2$ ,因此容量也减为原来的  $1/2$ 。

(3) 只用相对着的两只电刷时,由于这两只电刷等电位,电压为零,因此电机无法运行。

2. 答 由于单叠绕组的支路对数为单波绕组支路对数的  $p$  倍,单叠绕组总的电枢电流为单波绕组总的电枢电流的  $p$  倍。

由于总的元件数相同,单波绕组每条支路的元件数为单叠绕组的  $p$  倍;由于每个元件感应的电动势相同,单波绕组每条支路的电动势即电刷间电压为单叠绕组电刷间电压的  $p$  倍;由于直流电机的容量为端电压与电枢总电流的乘积,单叠和单波绕组的容量相同。单叠绕组适合于低电压大电流的场合,单波绕组适合于高电压小电流的场合。

3. 答 由  $p_{Cu} = I_a^2 R_a$  可知,当电枢电流  $I_a$  不变时,铜损耗  $p_{Cu}$  不变。

在直流电机中,铁损耗  $p_{Fe}$  和机械损耗  $p_n$  与转速  $n$  有关,当  $n$  下降时,  $p_{Fe}$  和  $p_n$  变小。

由  $E_a = C_e \Phi n$  可知,励磁电流  $I_f$  不变,  $\Phi$  也不变,当转速  $n$  下降时,电动势  $E_a$  变小。

由  $P_e = E_a I_a$  可知,电动势  $E_a$  变小,电磁功率  $P_e$  也变小。

由  $T_e = \frac{E_a I_a}{\Omega} = \frac{C_e \Phi I_a}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{60 C_e \Phi I_a}{2\pi}$  可知,  $T_e$  与转速  $n$  无关,故电磁

转矩  $T_e$  不变。

由  $P_2 = P_e - p_{Cu} - p_{Cuf}$  可知,当电枢电流  $I_a$  和励磁电流  $I_f$  不变时,  $p_{Cu}$  和  $p_{Cuf}$  不变,当转速  $n$  下降时,由于  $P_e$  变小,故输出功率  $P_2$  变小。

因为  $P_1 = P_e + p_{Fe} + p_n + p_\Delta$ ,由上述分析可知,当  $n$  下降时,  $P_e$ 、 $p_{Fe} + p_n$  均变小,而附加损耗  $p_\Delta$  不变,故输入功率  $P_1$  也变小。

4. 解 (1) 空载端电压  $U_0 = E_0$ ,从  $n = 760 \text{ r/min}$  时的空载特性可查出,  $I_f = 3.6 \text{ A}$  时的空载电动势  $E'_0 = 210 \text{ V}$ ,因电动势和转速成正

比,故可得额定转速  $n_N = 1000 \text{ r/min}$  时的空载电动势

$$E_0 = \frac{n_N}{n} E'_0 = \frac{1000}{760} \times 210 \text{ V} = 276.3 \text{ V}$$

则  $U_0 = E_0 = 276.3 \text{ V}$

(2) 满载时的感应电动势

$$E_{aN} = U_N + I_{aN} R_a = (230 + 11 \times 1) \text{ V} = 241 \text{ V}$$

(3) 改为并励发电机,励磁回路应串入电阻  $R_s$

$$R_s + R_f = \frac{U_N}{I_f} = \frac{230}{3.6} \Omega = 63.89 \Omega$$

$$R_s = 63.89 - R_f = (63.89 - 50) \Omega = 13.89 \Omega$$

(4) 已知额定转速时满载感应电动势  $E_{aN} = 241 \text{ V}$ , 换算到  $n = 760 \text{ r/min}$  时的电动势为  $E'_{aN} = E_{aN} \frac{n}{n_N} = 241 \times \frac{760}{1000} \text{ V} = 183.16 \text{ V}$ , 由  $E'_{aN}$

从空载特性上可查得所需励磁电流为  $I_{f0} = 2.6 \text{ A}$ , 因此电枢反应的去磁电流为  $I_f - I_{f0} = (3.6 - 2.6) \text{ A} = 1 \text{ A}$ , 电枢反应的去磁磁动势为  $1 \times 780 \text{ A} = 780 \text{ A}$ 。

5. 解 (1) 计算电动机的额定功率和额定转速。

发电机运行时的额定电流

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{26 \times 10^3}{115} \text{ A} = 226.09 \text{ A}$$

额定电枢电流  $I_{aN} = I_N = 226.09 \text{ A}$

电动机运行时的额定电流

$$I_{ND} = I_{aN} + I_{fN} = (226.09 + 6.8) \text{ A} = 232.89 \text{ A}$$

电动机运行时的额定功率

$$P_{ND} = I_{ND} U_{ND} \eta = 232.89 \times 110 \times 0.87 \text{ W} = 22.287 \text{ kW}$$

由于作发电机运行时和作电动机运行时励磁电流相等且不计电枢反应的影响,因而有

$$\Phi = \Phi_D$$

随之有

$$\frac{n_{ND}}{n_N} = \frac{C_e \Phi_D n_{ND}}{C_e \Phi_N} = \frac{E_{ND}}{E_N}$$

可见为计算  $n_{ND}$ , 应首先算出两种运行状态下的电动势。

作发电机运行于额定负载时的电动势

$$E_N = U_N + I_{aN} R_a = (115 + 226.09 \times 0.032) \text{ V} = 122.24 \text{ V}$$

作并励电动机运行于额定负载时的电动势

$$E_{ND} = U_{ND} - I_{aN} R_a = (110 - 226.09 \times 0.032) \text{ V} = 102.77 \text{ V}$$

于是得

$$n_{ND} = \frac{E_{ND}}{E_N} n_N = \frac{102.77}{122.24} \times 950 \text{ r/min} = 798.69 \text{ r/min}$$

(2) 计算电磁转矩。

$$\text{根据} \quad T_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{E_N I_{aN}}{2\pi n_N / 60}$$

发电机的电磁转矩

$$T_e = \frac{E_{ND} \cdot I_{aN}}{2\pi \frac{n_N}{60}} = \frac{122.24 \times 226.09}{2\pi \times 950 / 60} \text{ N} \cdot \text{m} = 277.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机的电磁转矩

$$T_{eD} = \frac{E_{ND} \cdot I_{aN}}{2\pi \frac{n_{ND}}{60}} = \frac{102.77 \times 226.09}{2\pi \times 798.69 / 60} \text{ N} \cdot \text{m} = 277.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

两种情况下的电磁转矩相等是可以预计到的, 因为  $\Phi$  和  $I_a$  均未变化。

(3) 电动机从满载到空载的转速变化。

电动机在空载时和额定负载时的电动势分别为

$$E_{0D} = U_{ND} - I_{a0} R_a \approx U_{ND} = 110 \text{ V (根据题意忽略空载电流 } I_{a0})$$

$$E_{ND} = U_{ND} - I_{aN} R_a = (110 - 226.09 \times 0.032) \text{ V} = 102.77 \text{ V}$$

忽略电枢反应,  $\Phi_D \approx \Phi_N$ , 因而

$$\frac{E_0}{E_N} = \frac{n_{0D}}{n_{ND}}$$

$$\begin{aligned} \text{故得} \quad n_{0D} &= \frac{E_0}{E_N} n_{ND} = \frac{110}{102.77} \times 798.69 \text{ r/min} \\ &= 854.88 \text{ r/min} \end{aligned}$$

转速变化率

$$\Delta n = \frac{n_{0D} - n_{ND}}{n_{ND}} \times 100\% = \frac{854.88 - 798.69}{798.69} \times 100\% = 7\%$$

6. 答 开始启动时由于转速为零,感应电动势也为零,启动电流为电源电压除以电枢回路总电阻  $R_s$ ,即  $I_s = U/R_s$ ,由于直流电动机电枢电阻  $R_s$  很小,因此在额定电压下的启动电流很大,约为额定电流的几十倍。这样大的电流会使换向困难,产生强烈的火花或环火,或使电流保护装置跳闸,所以必须在电枢回路中串电阻或降低电源电压以减小启动电流,一般将启动电流限制在两倍的额定电流以内。

7. 解 (1) 额定负载时的各种损耗及效率。

额定电枢电流

$$I_{aN} = I_N - I_{fN} = (500 - 4.8) \text{ A} = 495.2 \text{ A}$$

输入功率

$$P_1 = U_N I_N = 220 \times 500 \text{ W} = 110000 \text{ W}$$

电枢电路各串联绕组的总电阻

$$\begin{aligned} R'_s &= R_s + R_K + R_S = (0.01 + 0.004 + 0.001) \Omega \\ &= 0.015 \Omega \end{aligned}$$

电枢绕组铜耗

$$p_{\text{Cua}} = I_{aN}^2 R'_s = 495.2^2 \times 0.015 \text{ W} = 3678.4 \text{ W}$$

励磁绕组铜耗

$$p_{\text{Cuf}} = U_N I_{fN} = 220 \times 4.8 \text{ W} = 1056 \text{ W}$$

电刷接触损耗

$$p_s = 2\Delta U_s I_{aN} = 2 \times 495.2 \text{ W} = 990.4 \text{ W}$$

总损耗

$$\begin{aligned} \sum p &= p_{\text{Cua}} + p_s + p_{\text{Cuf}} + p_{\text{Fe}} + p_{\Omega} + p_{\Delta} \\ &= (3678.4 + 990.4 + 1056 + 1.17 \times 10^3 + 2.1 \times 10^3 + 1 \times 10^3) \text{ W} \\ &= 9994.8 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\eta_N = \left(1 - \frac{\sum p}{P_1}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{9994.8}{110000}\right) \times 100\% = 90.91\%$$

(2) 半载时的各种损耗和效率。

先求出半载时的电枢电流、电枢铁心中的磁通和电机的转速。

$$I_{N/2} = \frac{I_N}{2} = \frac{500}{2} \text{ A} = 250 \text{ A}$$

$$I_{aN/2} = I_{N/2} - I_{fN} = (250 - 4.8) \text{ A} = 245.2 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} E_N &= U_N - I_{aN} R_a - 2\Delta U_s \\ &= (220 - 495.2 \times 0.015 - 2) \text{ V} = 210.57 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{N/2} &= U_N - I_{aN/2} R_a - 2\Delta U_s \\ &= (220 - 245.2 \times 0.015 - 2) \text{ V} = 214.32 \text{ V} \end{aligned}$$

由于  $I_{fN}$  不变, 忽略电枢反应, 则磁通  $\Phi_N$  不变。

根据 
$$\frac{E_N}{E_{N/2}} = \frac{C_e \Phi_N n_N}{C_e \Phi_{N/2} n_{N/2}} = \frac{C_e \Phi_N n_N}{C_e \Phi_N n_{N/2}} = \frac{n_N}{n_{N/2}} \text{ 得}$$

$$\begin{aligned} n_{N/2} &= \frac{E_{N/2}}{E_N} n_N = \frac{214.32}{210.57} \times 1500 \text{ r/min} \\ &= 1526.73 \text{ r/min} \end{aligned}$$

于是得

$$\begin{aligned} p_{Fe(1/2)} &= p_{Fe} \left( \frac{n_{N/2}}{n_N} \right)^{1.5} \left( \frac{C_e \Phi_{N/2}}{C_e \Phi_N} \right)^2 = p_{Fe} \left( \frac{n_{N/2}}{n_N} \right)^{1.5} \\ &= 1.17 \left( \frac{1526.73}{1500} \right)^{1.5} \text{ kW} = 1.2 \text{ kW} = 2.156 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$p_{\Omega(1/2)} = p_{\Omega} \left( \frac{n_{N/2}}{n_N} \right)^{1.5} = 2.1 \times \left( \frac{1526.73}{1500} \right)^{1.5} \text{ kW}$$

而  $p_{Cu_s} = I_{aN/2}^2 R_a = 245.2^2 \times 0.015 \text{ W} = 901.85 \text{ W}$

$$p_s = I_{aN/2} \times 2\Delta U_s = 245.2 \times 2 \text{ W} = 490.4 \text{ W}$$

$$p_{Cu_f} = I_{fN} U_N = 4.8 \times 220 \text{ W} = 1056 \text{ W (不变)}$$

$$p_{\Delta(1/2)} = p_{\Delta} \left( \frac{I_{aN/2}}{I_{aN}} \right)^2 = 1000 \times \left( \frac{245.2}{495.2} \right)^2 \text{ W} = 245.18 \text{ W}$$

故得总损耗

$$\begin{aligned} \sum p_{(1/2)} &= p_{Cu_s} + p_s + p_{Cu_f} + p_{Fe(1/2)} + p_{\Omega(1/2)} + p_{\Delta(1/2)} \\ &= (901.85 + 490.4 + 1056 + 1.2 \times 10^3 + 2.156 \times 10^3 + 245.18) \text{ W} \\ &= 6049.43 \text{ W} \end{aligned}$$

半载时的输入功率

$$P_{1(1/2)} = U_N \frac{I_N}{2} = 220 \times \frac{500}{2} \text{ W} = 55000 \text{ W}$$

半载时的效率

$$\eta_{N(1/2)} = \left( 1 - \frac{\sum p_{(1/2)}}{P_{1(1/2)}} \right) \times 100\% = \left( 1 - \frac{6049.43}{55000} \right) \times 100\% \\ = 89\%$$

$$\begin{aligned} 8. \text{ 解 } (1) E_a &= \frac{pZ}{60a} \Phi n = \frac{2 \times 360}{60 \times 1} \times 1.2 \times 10^{-2} \times 1400 \text{ V} \\ &= 201.6 \text{ V} \end{aligned}$$

因  $E_a < U$ , 所以为电动机运行状态。

$$(2) I_a = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{220 - 201.6}{0.21} \text{ A} = 87.62 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} T_e &= 9.55 \times \frac{E_a I_a}{n} = 9.55 \times \frac{201.6 \times 87.62}{1400} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 120.5 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$(3) I_f = \frac{U}{R_f} = \frac{220}{122} \text{ A} = 1.8 \text{ A}$$

$$I = I_a + I_f = (87.62 + 1.8) \text{ A} = 89.42 \text{ A}$$

$$P_1 = UI = 220 \times 89.42 \text{ W} = 19672.4 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= P_e - p_{Fe} - p_n = E_a I_a - p_{Fe} - p_n \\ &= (201.6 \times 87.62 - 360 - 200) \text{ W} = 17104.2 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{17104.2}{19672.4} \times 100\% = 86.95\%$$

9. 解 (1) 发电机时, 电枢电流  $I_a = I_N + I_f$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{82 \times 10^3}{230} \text{ A} = 356.5 \text{ A}$$

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{230}{33} \text{ A} = 6.97 \text{ A}$$

$$I_a = I_N + I_f = (356.5 + 6.97) \text{ A} = 363.47 \text{ A}$$

发电机时的电动势

$$\begin{aligned} E_{aN} &= U_N + I_a R_a = (230 + 363.47 \times 0.033) \text{ V} \\ &= 242 \text{ V} \end{aligned}$$

电动机时的电动势

$$\begin{aligned} E_s &= U - I_a R_a = (220 - 363.47 \times 0.033) \text{ V} \\ &= 208 \text{ V} \end{aligned}$$

发电机时的转速  $n_N = \frac{E_{aN}}{C_e \Phi_G}$ , 电动机时的转速  $n = \frac{E_s}{C_e \Phi}$ , 则

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_N} &= \frac{E_s \Phi_G}{E_{aN} \Phi} = \frac{E_s U_N}{E_{aN} U} \\ n &= \frac{E_s U_N}{E_{aN} U} n_N = \frac{208 \times 230}{242 \times 220} \times 960 \text{ r/min} \\ &= 862.63 \text{ r/min} \end{aligned}$$

(2) 因  $T_0 = 1.2\% T_c$ , 每极磁通不变, 则

$$\begin{aligned} I_0 &= 1.2\% I_a = 1.2\% \times 363.47 \text{ A} = 4.36 \text{ A} \\ E_{a0} &= U - I_0 R_a = (220 - 4.36 \times 0.033) \text{ V} \\ &= 219.86 \text{ V} \\ n_0 &= \frac{E_{a0}}{E_s} n = \frac{219.86}{208} \times 862.63 \text{ r/min} \\ &= 911.8 \text{ r/min} \end{aligned}$$

**10. 答** 并励发电机向反方向运行时, 使电枢两端电压极性相反, 由于并励绕组接法改变, 励磁电流的方向和主磁通磁极的极性不变, 但发电机的电枢电流方向发生了变化。换向极绕组磁动势的作用是为了抵消电枢反应磁动势和产生换向极的气隙磁通磁密的, 为此它需要随电枢电流的改变而改变, 现由于换向极绕组仍是和电枢绕组串联的, 所以换向极绕组电流也随电枢电流的反向而改变了方向, 因此换向情况无变化。

**11. 解** (1) 负载分配。

先求出两台发电机的额定电流和空载电压(额定励磁电流时)为

$$\begin{aligned} I_{IN} &= \frac{P_{IN}}{U_{IN}} = \frac{19 \times 10^3}{230} \text{ A} = 82.6 \text{ A} \\ I_{IIN} &= \frac{P_{IIN}}{U_{IIN}} = \frac{14 \times 10^3}{230} \text{ A} = 60.9 \text{ A} \\ U_{I0} &= E_I = U_{IN} + I_{IN} R_{Ia} + 2\Delta U_s \\ &= (230 + 82.6 \times 0.239 + 2) \text{ V} = 251.7 \text{ V} \end{aligned}$$



$$U_{10} = E_{\text{II}} = U_{\text{II}N} + I_{\text{II}N}R_{\text{II}a} + 2\Delta U_s \\ = (230 + 60.9 \times 0.363 + 2) \text{ V} = 254.1 \text{ V}$$

设负载为 20 kW 时的端电压为  $U$ , 则

$$I_{\text{I}} = \frac{U_{10} - U - 2\Delta U_s}{R_{\text{I}}} = \frac{251.7 - 2 - U}{0.239} \text{ A} = \frac{249.7 - U}{0.239} \text{ A}$$

$$I_{\text{II}} = \frac{U_{\text{II}0} - U - 2\Delta U_s}{R_{\text{II}}} = \frac{254.1 - 2 - U}{0.363} \text{ A} = \frac{252.1 - U}{0.363} \text{ A}$$

而  $(I_{\text{I}} + I_{\text{II}})U = P$

即  $\left( \frac{249.7 - U}{0.239} + \frac{252.1 - U}{0.363} \right) U = 20 \times 10^3$

化简成  $6.94U^2 - 1739.3U + 20 \times 10^3 = 0$

解之得  $U = 238.54 \text{ V}$  和  $U = 12 \text{ V}$ , 显然  $12 \text{ V}$  不合理, 舍去。

负载分配

$$I_{\text{I}} = \frac{U_{10} - U - 2\Delta U_s}{R_{\text{I}}} = \frac{251.7 - 238.54 - 2}{0.239} \text{ A} = 46.7 \text{ A}$$

$$I_{\text{II}} = \frac{U_{\text{II}0} - U - 2\Delta U_s}{R_{\text{II}}} = \frac{254.1 - 238.54 - 2}{0.363} \text{ A} = 37.36 \text{ A}$$

(2) 可能供给的总负载。

由于两台发电机额定负载时端电压都是 230 V, 故两台发电机可以同时达到满载, 可能供给的总负载功率

$$P_{\Sigma} = P_{\text{I}} + P_{\text{II}} = (19 + 14) \text{ kW} = 33 \text{ kW}$$

12. 解 (1) 忽略各种损耗时,  $R_a = 0, T_o = 0$ , 则

$$E_{aN} = U_N = 600 \text{ V}$$

$$T_e = T_{2N} = 400 \text{ N} \cdot \text{m}$$

由电磁功率

$$P_e = E_{aN} I_{aN} = T_e \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{可得额定电枢电流 } I_{aN} &= \frac{T_e \Omega}{E_{aN}} = \frac{T_e \frac{2\pi n_N}{60}}{E_{aN}} \\ &= \frac{400 \times \frac{2\pi \times 1500}{60}}{600} \text{ A} \\ &= 104.72 \text{ A} \end{aligned}$$

(2) 已知电枢电压为  $U_N$ , 转速为 3000 r/min, 当电枢电流达到额定值, 即  $I_a = I_{aN}$  时, 电动机能输出的转矩达到最大值  $T_{2\max}$ , 此时,  $E_a = E_{aN}$ , 则

$$\frac{T_{2\max}}{T_e} = \frac{\Phi I_a}{\Phi_N I_{aN}} = \frac{\Phi}{\Phi_N} = \frac{n_N}{n}$$

$$T_{2\max} = \frac{n_N}{n} T_e = \frac{1500}{3000} \times 400 \text{ N} \cdot \text{m} = 200 \text{ N} \cdot \text{m}$$

13. 解 (1) 额定感应电动势(略去励磁电流)

$$E_{aN} = U_N - I_a R_a = (500 - 220 \times 0.06) \text{ V} = 486.8 \text{ V}$$

降低转速后, 励磁电流不变, 每极磁通不变, 则感应电动势

$$E_a = E_{aN} \frac{n}{n_N} = 486.8 \times \frac{600}{700} \text{ V} = 417.3 \text{ V}$$

降低转速后, 负载转矩不变  $T_N = C_T \Phi_N I_N = C_T \Phi I_a$ , 则

$$\text{电枢电流} \quad I_a = I_N = 220 \text{ A}$$

$$\text{故} \quad E_a = U_N - I_a (R_a + R_{ad})$$

$$\text{则 } R_{ad} = \frac{U_N - E_a}{I_a} - R_a = \left( \frac{500 - 417.3}{220} - 0.06 \right) \Omega = 0.316 \Omega$$

(2) 附加电阻上的损耗

$$p_{ad} = I_a^2 R_{ad} = 220^2 \times 0.316 \text{ W} = 15294.4 \text{ W}$$

原额定负载时的损耗

$$\begin{aligned} \sum p &= P_1 (1 - \eta_N) = [500 \times 220 \times (1 - 0.9)] \text{ W} \\ &= 11000 \text{ W} \end{aligned}$$

降速后总损耗

$$\sum p' = \sum p + p_{ad} = (11000 + 15294.4) \text{ W} = 26294.4 \text{ W}$$

降速后的效率

$$\eta = 1 - \frac{\sum p'}{P_1} = 1 - \frac{26294.4}{500 \times 220} = 76\%$$

可见, 电枢回路串电阻进行调速, 附加电阻上的功耗较大, 造成效率下降, 不经济。

14. 解 将空载特性通过  $C_e \Phi = \frac{E_0}{n_N}$  化成  $C_e \Phi = f(I_{f0})$  的形式, 其

数据如下表所示。

$I_{\text{fo}}/\text{A}$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3
$C_e\Phi$	0.0835	0.12	0.158	0.182	0.191	0.1986	0.204

(1) 当电压从 220V 降至 180V 时,励磁回路电阻不变,励磁绕组中的励磁电流

$$I_f = \frac{U}{U_N} I_{fN} = \frac{180}{220} \times 1.2 \text{ A} = 0.982 \text{ A}$$

原励磁电流  $I_{fN} = 1.2 \text{ A}$ ,由空载特性曲线查得

$$C_e\Phi_N = 0.1986 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

当  $I_f = 0.982 \text{ A}$  时,用插入法求得

$$C_e\Phi = 0.182 - \frac{1.0 - 0.982}{1.0 - 0.8} (0.182 - 0.158) = 0.18 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

原电枢电流  $I_{aN} = I_N - I_{fN} = (45 - 1.2) \text{ A} = 43.8 \text{ A}$

降压后负载转矩不变,故电枢电流

$$I_a = \frac{C_e\Phi_N}{C_e\Phi} I_{aN} = \frac{0.1986}{0.18} \times 43.8 \text{ A} = 48.33 \text{ A}$$

输入电流

$$I = I_a + I_f = (48.33 + 0.982) \text{ A} = 49.312 \text{ A}$$

(2) 降压后电机负载转速

$$\begin{aligned} n &= \frac{U - I_a R_a - 2\Delta U_s}{C_e\Phi} = \frac{180 - 48.33 \times 0.6 - 2}{0.18} \text{ r/min} \\ &= 827.8 \text{ r/min} \end{aligned}$$

降压后电机的空载转速

$$n_0 = \frac{U}{C_e\Phi} = \frac{180}{0.18} \text{ r/min} = 1000 \text{ r/min}$$

转速变化率

$$\begin{aligned} \Delta n &= \frac{n_0 - n}{n} \times 100\% = \frac{1000 - 827.8}{827.8} \times 100\% \\ &= 20.8\% \end{aligned}$$

## 第4章 交流绕组及其电动势和磁动势

### 4.1 重点和难点

#### 4.1.1 重点

##### 1. 交流绕组的构成原则

交流绕组的种类很多,绕组构成的原则却基本相同,这些原则是:

① 必须满足对称要求,即在三相绕组中,各相绕组的结构应完全相同,在空间上互差的角度也相等;

② 每相绕组能力求获得较大的基波电动势和基波磁动势;

③ 尽量削弱谐波电动势和谐波磁动势,力求波形接近正弦波;

④ 应考虑节省材料、便于制造和检修;

⑤ 绝缘要可靠、机械强度要高、散热条件要好。

##### 2. 槽电动势星形图

槽电动势星形图是表示定子各槽内导体电动势相位关系的时间相量图。而定子各槽内导体电动势在时间上的相位关系取决于定子槽的空间位置,可见槽电动势星形图与定子槽的空间分布情形相对应。

定子相邻两槽间的距离以电角度表示时,称为槽距电角,简称槽距角,用 $\alpha$ 表示。由于整个定子圆周为 $360^\circ$ 机械角度,以电角度计算时,一对极距范围就等于 $360^\circ$ 电角度。当电机有 $p$ 对磁极时,则定子圆周应为 $p \times 360^\circ$ 电角度,设定子槽数为 $Q_1$ ,因此,槽距电角

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1}$$

假设气隙磁场的磁密沿气隙圆周按正弦规律分布,并以恒定速度旋转,则定子各槽内导体的感应电动势将随时间按正弦规律变化。由于各槽在空间彼此互差 $\alpha$ 电角度,因此各导体电动势在时间相位上也彼此互差 $\alpha$ 电角度。一般来说,对于整数槽绕组(即每极每相槽数 $q = \text{整数}$ ),

如果电机有  $p$  对极, 则其槽电动势星形图中有  $p$  个重叠的槽电动势星形。普遍地说, 当  $p$  和  $Q_1$  有最大公约数  $t$  时, 则有  $t$  个重合的槽电动势星形。

对于单层绕组, 槽电动势星形图中的各电动势相量应视为导体电动势; 对于双层绕组, 槽电动势星形图中的各电动势相量应视为线圈电动势。

### 3. 三相双层绕组特点及分类

#### 1) 特点

① 每个槽内放置上、下两个线圈边。

② 定子绕组中线圈的个数等于定子槽数  $Q_1$ 。

③ 定子绕组中极相组(又称线圈组)的个数  $= \frac{Q_1}{q}$  ( $q$  为每极每相槽数)。

④ 每相绕组中极相组的个数  $= \frac{Q_1}{qm_1}$  ( $m_1$  为定子绕组的相数), 当定子绕组为  $60^\circ$  相带绕组时,  $\frac{Q_1}{qm_1} = 2p$ 。

⑤ 每个线圈的匝数  $N_c = \frac{\text{每槽导体数}}{2}$ 。

⑥ 每个极相组的匝数为  $qN_c$ 。

⑦ 每相串联匝数(即每相每条支路的串联匝数)  $N = \frac{\text{每相总的串联匝数}}{a} = \frac{\text{定子总导体数}}{2m_1 a}$ , 当定子绕组为  $60^\circ$  相带绕组时,  $N = \frac{2pqN_c}{a}$  ( $a$  为并联支路数)。

#### 2) 优点

① 可采用短距, 改善电动势、磁动势的波形。

② 线圈尺寸相同, 便于绕制。

③ 端部排列整齐、利于散热、机械强度高。

#### 3) 分类

① 叠绕组 —— 相邻的两个串联线圈中, 后一个线圈紧叠在前一个

线圈上。

② 波绕组 —— 两个相联结的线圈呈波浪式前进。

#### 4. 三相单层绕组的特点及分类

##### 1) 特点

① 每个槽内只放置一个线圈边。

② 定子绕组中线圈的个数等于  $\frac{Q_1}{2}$ 。

③ 定子绕组中极相组的个数  $= \frac{Q_1}{2q}$ 。

④ 每相绕组中极相组的个数  $= \frac{Q_1}{2qm_1}$ ，当定子绕组为  $60^\circ$  相带绕组

时， $\frac{Q_1}{2qm_1} = p$ 。

⑤ 每个线圈的匝数  $N_c =$  每槽导体数。

⑥ 每个极相组的匝数为  $qN_c$ 。

⑦ 每相串联匝数（即每相每条支路的串联匝数） $N =$   

$$\frac{\text{每相总的串联匝数}}{a} = \frac{\text{定子总导体数}}{2m_1 a}$$
，当定子绕组为  $60^\circ$  相带绕组时，

$$N = \frac{pqN_c}{a}。$$

##### 2) 优点

① 线圈个数比双层少一半，嵌线方便。

② 槽内无层间绝缘，槽的利用率高。

③ 同一槽中的导线都属于同一相，在槽内不可能发生相间击穿。

##### 3) 分类

① 同心式绕组 —— 由不同节距的同心线圈组成。

② 链式绕组 —— 由具有相同节距的线圈组成。

③ 交叉式绕组 —— 采用不等距的线圈组成，节省电磁线。

#### 5. 交流绕组常用术语

(1) 电角度。计量电磁关系的角度单位称为电气角度，简称电角度。电机圆周在几何上占有角度为  $360^\circ$ ，称为机械角度。从电磁方面看，对

于一个按一定周期变化的物理量(如磁动势、电动势、电压、电流等)完成一个交变周期,其相位即变化了  $360^\circ (2\pi \text{ rad})$ ,把这种无形的角度称为电角度。因此,一对磁极占有空间电角度为  $360^\circ$ 。而对于4极(磁极对数  $p = 2$ )电机,其电角度为机械角度的两倍,一般而言,对于  $p$  对极电机,其电角度为机械角度的  $p$  倍,即

$$\text{电角度} = p \times \text{机械角度}$$

(2) 槽距电角。定子相邻两槽之间的距离以电角度表示时,称为槽距电角,用  $\alpha$  表示,其计算式为

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1}$$

式中:  $Q_1$  为定子槽数。

(3) 极距。每个磁极在定子铁心的内圆上所占的范围称为极距,用  $\tau$  表示。极距可以用槽数、对应的圆弧长度或电角度量度,即

$$\tau = \frac{Q_1}{2p} \quad \text{或} \quad \tau = \frac{\pi D_{i1}}{2p} \quad \text{或} \quad \tau = 180^\circ$$

式中:  $D_{i1}$  为定子铁心内径。

(4) 线圈节距。一个线圈的两个有效边在定子铁心内圆周所跨的距离称为节距,用  $y_1$  表示。它有整距、短距和长距之分:

①  $y_1 = \tau$  时为整距线圈,它可以产生最大的感应电动势;

②  $y_1 < \tau$  时为短距线圈,它可以缩短线圈端部联结,节省电磁线,改善电机的性能;

③  $y_1 > \tau$  时为长距线圈,浪费电磁线,只在特殊电机(如单绕组变极多速感应电动机)中采用。

节距(又称跨距)有两种表示形式,例如,用槽数表示节距时,若  $y_1 = 8$ ,也可表示为  $y_1 = 1-9$ ;同理,若  $y = 9$ ,也可表示为  $y = 1-10$ 。

(5) 每极每相槽数。每个磁极下面每相绕组所占的槽数称为每极每相槽数,用  $q$  表示,即

$$q = \frac{Q_1}{2pm_1}$$

式中:  $p$  为电机的极对数;  $m_1$  为定子绕组的相数。

(6) 相带。为了使定子绕组对称,通常令每个磁极下每相绕组所占

的范围相等,这个范围称为相带。对于三相交流电机。由于一个磁极相当于  $180^\circ$  电角度,分配到三相,则每相的相带为  $60^\circ$  电角度,按  $60^\circ$  相带排列的绕组称为  $60^\circ$  相带绕组。

三相交流电机还有一种划分相带的方法,即将每一对磁极分为三等份,则每相占  $120^\circ$  电角度,也可以得到三相对称绕组。按  $120^\circ$  相带排列的绕组称为  $120^\circ$  相带绕组。

由于  $60^\circ$  相带绕组的合成电动势比  $120^\circ$  相带绕组的合成电动势大,故除了单绕组变极多速感应电动机外,一般都采用  $60^\circ$  相带绕组。

(7) 极相组。将一个磁极下属于同一相(即一个相带)的  $q$  个线圈,按照一定方式串联成一组,称为极相组。

(8) 节距因数(又称短距系数)。它表示线圈短距时的感应电动势比于整距时应打的折扣,可表示为

$$\text{基波节距因数} \quad k_{p1} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ$$

$$\nu \text{ 次谐波节距因数} \quad k_{p\nu} = \sin \nu \frac{y_1}{\tau} 90^\circ$$

(9) 分布因数(又称分布系数)。它表示  $q$  个分布线圈的合成电动势小于  $q$  个集中线圈的合成电动势,因此应打的折扣为

$$\text{基波分布因数} \quad k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$\nu \text{ 次谐波分布因数} \quad k_{d\nu} = \frac{\sin \nu \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \nu \frac{\alpha}{2}}$$

(10) 绕组因数(又称绕组系数)。它表示既考虑线圈短距,又考虑绕组分布时,整个绕组合成电动势所需打的总折扣,可表示为

$$\text{基波绕组因数} \quad k_{w1} = k_{p1} k_{d1}$$

$$\nu \text{ 次谐波绕组因数} \quad k_{w\nu} = k_{p\nu} k_{d\nu}$$

## 6. 交流绕组相电动势

在正弦波磁场下,交流绕组相电动势的计算公式为



$$E_{\phi 1} = 4.44 f_1 N k_{w1} \Phi_1$$

式中:  $E_{\phi 1}$  为一相绕组基波感应电动势的有效值(V);  $f_1$  为基波感应电动势的频率(Hz),  $f_1$  与绕组的极对数  $p$ 、主磁场与绕组相对运动的转速  $n_1$  有关, 即  $f_1 = \frac{pn_1}{60}$ ;  $N$  为一相绕组的串联匝数, 即一相绕组中一条支路的匝数;  $k_{w1}$  为基波绕组因数;  $\Phi_1$  为基波的每极磁通(Wb)。

### 7. 谐波电动势

当主极磁场沿空间不按正弦规律分布时, 磁场中的高次谐波将在绕组内感应出相应的谐波电动势。 $\nu$  次谐波电动势计算公式为

$$E_{\phi \nu} = 4.44 f_{\nu} N k_{w\nu} \Phi_{\nu}$$

式中:  $E_{\phi \nu}$  为一相绕组  $\nu$  次谐波感应电动势的有效值(V);  $f_{\nu}$  为  $\nu$  次谐波感应电动势的频率(Hz),  $f_{\nu} = \nu f_1$ ;  $N$  为一相绕组的串联匝数, 即一相绕组中一条支路的匝数;  $k_{w\nu}$  为  $\nu$  次谐波绕组因数;  $\Phi_{\nu}$  为  $\nu$  次谐波的每极磁通(Wb)。

### 8. 相电动势和线电动势

考虑谐波电动势在内, 相电动势的有效值应为

$$E_{\phi} = \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 3}^2 + E_{\phi 5}^2 + E_{\phi 7}^2 + \dots}$$

考虑谐波电动势在内, 线电动势的有效值应为

$$\text{Y 联结时} \quad E_L = \sqrt{3} \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 5}^2 + E_{\phi 7}^2 + \dots}$$

$$\Delta \text{ 联结时} \quad E_L = \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 5}^2 + E_{\phi 7}^2 + \dots}$$

即在三相对称绕组中, 无论采用 Y 联结还是采用  $\Delta$  联结, 线电动势中都不存在 3 次及 3 的倍数次谐波, 这是三相绕组在电动势方面的优点。但当采用  $\Delta$  联结时, 由于闭合回路中的 3 次谐波环流引起附加损耗, 将使电机的效率下降、温升增高, 所以, 现代同步发电机一般采用 Y 联结, 而不采用  $\Delta$  联结。

### 9. 高次谐波的不良影响

电机电动势中存在高次谐波, 将使电动势波形畸变, 产生不良影响:

① 对发电机, 高次谐波将使电动势波形变坏、杂散损耗增大、效率下降、温升增高;

② 对电动机,高次谐波电流亦产生杂散损耗,对电动机的效率、温升以及启动性能都会产生影响;

③ 对邻近通讯设备,特别是和输电线平行的通讯线路会产生干扰。

因此设计电机时,必须设法削弱高次谐波,特别是影响较大的 3, 5, 7 等次谐波电动势。

#### 10. 削弱高次谐波电动势常用的方法

(1) 改善主极磁场分布。对凸极同步电机,采用非均匀气隙;对隐极同步电机,则改善主极磁动势的分布,使主极磁场在气隙中近于正弦分布。

(2) 采用三相绕组的联结(Y 或  $\Delta$ ) 来消除线电动势中的 3 次及 3 的倍数次的奇次谐波电动势。

(3) 采用短距绕组来削弱高次谐波电动势。当线圈的节距  $y_1 = \left(1 - \frac{1}{\nu}\right)\tau$  时,可以消除  $\nu$  次谐波电动势。通常采用  $y_1 \approx \frac{5}{6}\tau$ ,这时可以同时削弱 5 次和 7 次谐波电动势。

(4) 采用分布绕组来削弱高次谐波电动势。当每极每相槽数  $q$  增加时,基波分布因数略有减小,但谐波分布因数却显著减小,因此,采用分布绕组可以削弱高次谐波电动势。当  $q > 6$  时,高次谐波分布因数的下降已不太显著,因此,一般电机的  $q$  均在  $2 \sim 6$  范围内。

#### 11. 单相绕组

单相绕组通入单相交流电流时,产生的磁动势是脉振磁动势,其特点是:从空间上看,磁动势的轴线为固定不动;从时间上看,磁动势的波幅不断地随电流的交变而在正、负幅值之间变化。

对正常接法的交流绕组有以下几种情况。

(1) 单相绕组的磁动势只包含基波和  $\nu = 2k + 1 (k = 1, 2, 3, \dots, n)$  次谐波。

(2) 当电机的极对数为  $p$  时,则基波磁动势的极对数为  $p$ ,  $\nu$  次谐波磁动势的极对数为  $\nu p$ 。

(3) 相绕组磁动势的基波波幅必在相绕组的轴线(也即构成相绕组的线圈组的中心线)上,而各高次谐波则必有一个波幅落在相绕组轴线上。

(4) 单相绕组所产生的基波磁动势的幅值  $F_{\phi 1}$  和  $\nu$  次谐波磁动势的

幅值  $F_{\nu}$  分别为

$$F_{\pm 1} = 0.9 \frac{Nk_{w1}}{p} I_{\phi}$$

$$F_{\nu} = \frac{1}{\nu} 0.9 \frac{Nk_{w\nu}}{p} I_{\phi}$$

式中:  $N$  为每相串联匝数;  $k_{w1}$  为基波绕组因数;  $k_{w\nu}$  为  $\nu$  次谐波绕组因数;  $I_{\phi}$  为相电流有效值。

(5) 若将坐标原点选在相绕组轴线上, 则基波磁动势  $f_{\pm 1}$  和  $\nu$  次谐波磁动势  $f_{\nu}$  的表达式分别为(设电流随时间作余弦变化)

$$f_{\pm 1} = F_{\pm 1} \cos \theta_s \cos \omega t$$

$$f_{\nu} = F_{\nu} \cos \nu \theta_s \cos \omega t$$

式中:  $\theta_s$  为空间电角度;  $\omega$  为相绕组所通入的电流的角频率。

## 12. 对称三相绕组

对称三相绕组通以对称三相电流时, 三相合成磁动势的基波为圆形旋转磁动势, 其特点是波形不变(正弦分布)、波幅恒定、沿气隙圆周旋转, 波幅的轨迹为一个圆, 其表达式为

$$f_1 = F_1 \cos(\omega t - \theta_s)$$

(1) 基波合成磁动势的幅值

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\pm 1} = 1.35 \frac{Nk_{w1}}{p} I_{\phi}$$

(2) 基波合成磁动势的转速, 即同步转速

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

(3) 当某相电流达最大值时, 基波合成磁动势的波幅就与该相绕组的轴线重合。

(4) 基波合成磁动势的转向取决于三相电流的相序和三相绕组在空间上的排列次序。基波合成磁动势的转向是从电流超前的相绕组轴线转向电流滞后的相绕组轴线。

(5) 改变三相绕组中电流的相序, 就可以改变旋转磁动势的转向。因此, 只要把接到电动机的三根电源线中任意对调两根就可以改变旋转磁动势的旋转方向。

13.  $\nu$  次谐波磁动势

在三相合成磁动势的高次谐波中不存在 3 次及 3 的倍数次谐波, 只存在  $\nu = 6k \pm 1 (k = 1, 2, 3, \dots, n)$  次谐波。 $\nu$  次谐波磁动势的表达式为

$$f_{\nu} = F_{\nu} \cos(\omega t \pm \nu \theta_s)$$

式中: 当  $\nu = 6k + 1$  时取负号; 当  $\nu = 6k - 1$  时取正号。

(1)  $\nu$  次谐波合成磁动势的幅值

$$F_{\nu} = \frac{3}{2} F_{\nu\omega} = 1.35 \frac{Nk_{\nu\omega} I_{\omega}}{p}$$

(2)  $\nu$  次谐波合成磁动势的转速

$$n_{\nu} = \frac{1}{\nu} n_s = \frac{60f}{\nu p}$$

(3)  $\nu$  次谐波合成磁动势的转向为

$\nu = 6k + 1$  时, 转向与基波相同;

$\nu = 6k - 1$  时, 转向与基波相反。

## 14. 削弱谐波磁动势的方法

谐波磁动势(或相应的谐波磁场)的存在, 在交流电机中引起振动和噪声, 产生杂散损耗使效率降低。对感应电动机还会产生一定的附加转矩(又称寄生转矩), 影响电动机的启动性能。

为了改善电机的性能, 应设法削弱磁动势中的高次谐波, 使定子磁动势波形接近于正弦波。和削弱电动势中的谐波方法相似, 由于谐波磁动势的幅值与其绕组系数成正比, 因此采用短距和分布绕组能削弱磁动势中的高次谐波。例如, 采用  $y_1 = \frac{5}{6} \tau$  能同时有效地削弱 5 次和 7 次谐波磁动势。

## 4.1.2 难点

## 1. 绘制绕组展开图

绘制绕组展开图的步骤(以三相双层叠绕组为例)。

## 1) 绘槽电动势星形图

由于各槽在空间彼此互差  $\alpha$  电角度, 因此, 各槽内导体中的感应电动势在时间上也彼此互差  $\alpha$  电角度。假设 1 号槽的导体电动势以相量 1

表示,2号槽的导体电动势相量2比相量1滞后 $\alpha$ 电角度,同理,相量3比相量2滞后 $\alpha$ 电角度,依此类推,就可绘制出槽电动势星形图。

在双层绕组中,上层线圈边的电动势星形与槽电动势星形完全相同。下层线圈边的位置取决于线圈的节距 $y_1$ 。如果把各个线圈的上层边电动势相量与下层边电动势相量相减,可得到各线圈的电动势相量,它们也可构成一个电动势星形,相邻两相量间的相位差也是 $\alpha$ ,所以在双层绕组里,槽电动势星形的每一个相量既可以假定为槽内上层线圈边的电动势相量,也可以假定为线圈的电动势相量。

### 2) 分相(以 $60^\circ$ 相带绕组为例)

分相就是在星形图上划分各相所属槽号。分相的原则是使每相电动势最大,且三相电动势对称。为了使三相电动势相等,每相在每极下应占有相等的槽数,该槽数称为每极每相槽数,以 $q$ 表示。

对于 $60^\circ$ 相带绕组,每极每相槽数

$$q = \frac{Q_1}{2pm_1}$$

根据分相原则和每极每相槽数 $q$ ,就可在星形图上进行分相。

设每极每相槽数 $q$ 等于整数。以A相为例,A相在每个极下应占有 $q$ 个槽。在第一对极距范围内,如果在 $N_1$ 极下将1号槽至 $q$ 号槽划归A相,在旁边标以字母A。为了使每相合成电动势最大,则应把 $N_1$ 极下的分别距1号槽至 $q$ 号槽 $180^\circ$ 电角度的 $q$ 个槽也划归A相,标以字母X。类似地把第二对极距范围内的 $2q$ 个槽也划归A相,依此类推,分别将各对距范围内的 $2q$ 个槽也划归A相。

同理,为了使三相绕组对称,应将分别距A相 $120^\circ$ 电角度的 $2pq$ 个槽划归B相。而将分别距A相 $240^\circ$ 电角度的 $2pq$ 个槽划归C相。由于各相绕组在空间相隔 $120^\circ$ 电角度。因此,每对极下6个相带依次命名为A、Z、B、X、C、Y。

### 3) 绘绕组展开图

绘绕组展开图就是根据星形图上分相的结果,把属于各相的导体按一定规律联结起来,组成三相绕组。绘图时上层边用实线表示,下层边用虚线表示,其编号原则是线圈和线圈的上层边所在的槽编为同一

号码。

首先根据线圈节距  $y_1$  分别将各槽内的上层导体与相距  $y_1$  槽的下层导体构成一个线圈,共可构成  $Q_1$  个线圈;然后再将各个磁极下,属于同一相的  $q$  个线圈串联成为一个线圈组(又称极相组),共可构成  $2pm_1$  个线圈组。

#### 4) 接线

在双层叠绕组中,每一个极相组内部的线圈是依次串联的,不同磁极下的各个极相组之间视具体需要既可接成串联,亦可接成并联。以 A 相绕组为例,设 A 相绕组的首端为 1 号线圈的引出线。由于极相组 A 的电动势方向与极相组 X 的电动势方向相反,电流方向亦相反,为避免电动势互相抵消或者电流所形成的磁场互相抵消,串联时应把极相组 A 和极相组 X 反向串联,各相邻极相组之间的联结规律为“尾接尾,头接头”,这样就连成了 A 相绕组。

B 相和 C 相绕组的联结规律与 A 相绕组的联结规律相同,但是应注意: B 相绕组的首端应滞后 A 相绕组的首端  $120^\circ$  电角度;同理, C 相绕组的首端应滞后 A 相绕组的首端  $240^\circ$  电角度。

#### 2. 单相基波脉振磁动势的分解

取相绕组的轴线处作为空间坐标的原点,设绕组中通入的电流  $i = \sqrt{2}I_1 \cos \omega t$ , 则单相基波脉振磁动势方程为

$$f_{\theta 1} = F_{\theta 1} \cos \theta_s \cos \omega t$$

此式表明,任一瞬间沿定子内圆周分布的单相基波磁动势波为一余弦波,而在空间任一点的磁动势大小又同时随时间按余弦规律变化。利用三角函数公式,上式可写成

$$\begin{aligned} f_{\theta 1} &= \frac{1}{2} F_{\theta 1} \cos(\omega t - \theta_s) + \frac{1}{2} F_{\theta 1} \cos(\omega t + \theta_s) \\ &= f'_{\theta 1} + f''_{\theta 1} \end{aligned}$$

即一个脉振磁动势可以分解为两个幅值为  $\frac{1}{2} F_{\theta 1}$  的磁动势,它们也是时间  $t$  和空间  $\theta_s$  的函数。进一步分析表明,磁动势  $f'_{\theta 1}$  是一个幅值不变,以相应于脉振的频率的速度正向旋转的正弦波;而磁动势  $f''_{\theta 1}$  也是一个幅

值不变,与  $f'_{\phi 1}$  速度相同但旋转方向相反的正弦波。

因此,可得出以下结论:一个正弦分布的脉振磁动势可以分解成两个波长相同、幅值相等、旋转方向相反的旋转磁动势,旋转磁动势的幅值为脉振磁动势幅值的  $1/2$ ,转速均为同步转速  $n_s$ 。

### 3. 求三相绕组高次谐波的注意事项

在求三相绕组产生的各高次谐波的合成磁动势时,分析的方法与求基波的合成磁动势时相同。但需注意到以下问题。

(1) 三相绕组中的电流相位仍为互差  $120^\circ$  电角度。

(2) 对基波磁动势而言,三相绕组的轴线在空间互隔  $120^\circ$  电角度;对  $\nu$  次谐波磁动势而言,三相绕组的轴线互隔  $\nu \times 120^\circ$  电角度。

对于磁动势的三次谐波,  $\nu = 3$ , 3 个单相绕组产生的 3 次谐波脉振磁动势的表达式为

$$f_{A3} = F_{\phi 1} \cos 3\theta_s \cos \omega t$$

$$f_{B3} = F_{\phi 1} \cos 3(\theta_s - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) = F_{\phi 1} \cos 3\theta_s \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$f_{C3} = F_{\phi 1} \cos 3(\theta_s - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) = F_{\phi 1} \cos 3\theta_s \cos(\omega t - 240^\circ)$$

上式说明,三相绕组各相的 3 次谐波脉振磁动势在空间是同相位的。

把  $f_{A3}$ 、 $f_{B3}$ 、 $f_{C3}$  相加,可得三相绕组的 3 次合成磁动势  $f_3$  为

$$\begin{aligned} f_3(\theta_s, t) &= f_{A3} + f_{B3} + f_{C3} \\ &= F_{\phi 1} \cos 3\theta_s [\cos \omega t + \cos(\omega t - 120^\circ) + \cos(\omega t - 240^\circ)] \\ &= 0 \end{aligned}$$

此式说明,由于  $f_{A3}$ 、 $f_{B3}$ 、 $f_{C3}$  在空间上同相位(都是  $3\theta_s$ ),而在时间上互差  $120^\circ$  电角度,故三相绕组的 3 次谐波合成磁动势为零。同样可以证明,在对称的三相电机中,合成磁动势中不存在 3 次及 3 的整数倍的任何奇次谐波,即不存在 3, 9, 15, 21, ... 次谐波。

### 4. 椭圆形旋转磁动势

对称多相绕组通以对称多相电流,其产生的合成磁动势为圆形旋转磁动势。当电流不对称或绕组不对称时,该电流或绕组产生的合成磁动势为椭圆形旋转磁动势。椭圆形旋转磁动势是两个幅值不相等、转向相反的圆形旋转磁动势  $F_+$  和  $F_-$  的叠加( $F_+$  为正向圆形旋转磁动势的幅值,  $F_-$  为反向圆形旋转磁动势的幅值)。

椭圆形旋转磁动势具有以下特点:

① 椭圆形旋转磁动势的最大值(椭圆的长轴)为  $F_+ + F_-$ , 最小值(椭圆的短轴)为  $F_+ - F_-$ , 两轴的比值决定椭圆的程度;

② 椭圆形旋转磁动势的角速度  $\Omega$  不是常数, 在椭圆的长轴附近的角速度低些, 而在短轴附近的角速度高些;

③ 椭圆形旋转磁动势的旋转方向视正向旋转磁动势  $F_+$  和反向旋转磁动势  $F_-$  哪一个强而定。

椭圆形旋转磁动势是交流绕组磁动势的普遍形式。当正向旋转磁动势  $F_+$  和反向旋转磁动势  $F_-$  中任一个为零时, 便是圆形旋转磁动势; 当  $F_+ = F_-$  时, 便是脉振磁动势。

## 4.2 习题详解

4-1 什么叫做槽电动势星形图? 如何利用槽电动势星形图来进行相带划分?

答 交流绕组内的感应电动势通常为正弦交流电动势, 故可用相量表示和运算。在交流电机中, 当把电枢上各槽内导体按正弦规律变化的电动势分别用相量表示时, 这些相量将构成一个辐射星形图, 故称为槽电动势星形图。

下面用一个具体例子来说明如何利用槽电动势星形图进行相带划分。

图 4-1 所示是一台三相同步发电机定子槽内导体沿圆周分布情况, 已知极数  $2p = 4$ , 定子槽数  $Q = 36$ 。由于整个电枢圆周为  $360^\circ$  机械角度, 以电角度计算时, 一对极距范围就等于  $360^\circ$  电角度。当电机有  $p$  对极时, 电枢圆周应为  $p360^\circ$  电角度, 因此, 槽距电角

$$\alpha = \frac{p360^\circ}{Q} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

假设磁极磁场的磁通密度沿气隙圆周按正弦规律分布, 转子沿逆时针方向恒速旋转, 则定子各槽内导体的感应电动势将随时间变化而按正弦规律变化。由于各槽在空间彼此互差  $\alpha$  电角度, 因此各导体电动势在时间相位上也彼此互差  $\alpha$  电角度。于是, 假设 1 号槽的导体电动势



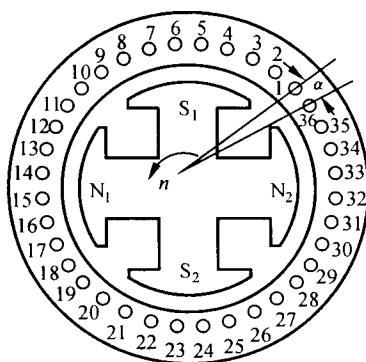


图 4-1 槽内导体沿定子圆周的分布情况

以相量 1 表示(见图 4-2(a)),则在图 4-1 所示的转子转向下,2 号槽的电动势相量 2 比相量 1 滞后  $20^\circ$ 。同理,相量 3 比相量 2 滞后  $20^\circ$ 。依此类推,就可绘出图 4-2(a) 所示的槽电动势星形图。

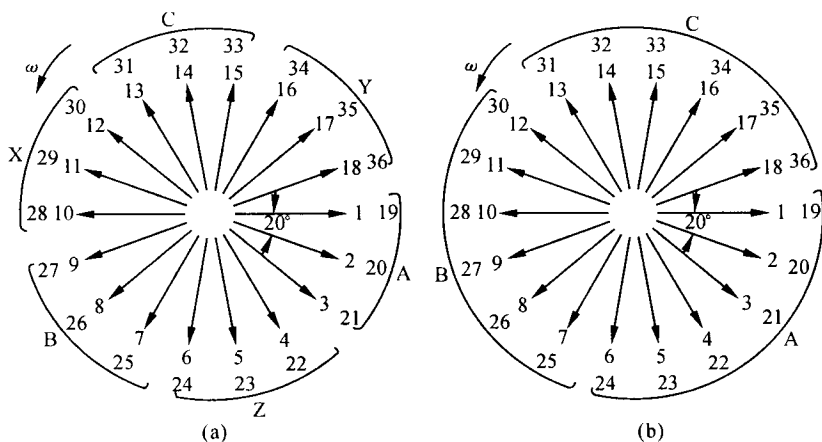


图 4-2 槽电动势星形图

(a)  $60^\circ$  相带; (b)  $120^\circ$  相带

划分相带(简称分相)就是在槽电动势星形图上划分各相所属的槽

号。分相的原则是使每相电动势最大,且三相电动势对称。为了使三相电动势对称且相等,每相在每极(或每对极)下应占有相等的槽数,该槽数称为每极每相槽数  $q$ 。

通常把每极(或每对极)下每相所占的区域称为相带。常用的有  $60^\circ$  相带和  $120^\circ$  相带。如果把每极下的电枢表面分为三等份,每相占一份,则每相所占的区域为  $\frac{180^\circ}{m} = \frac{180^\circ}{3} = 60^\circ$ ,故称为  $60^\circ$  相带;如果把每对极下的电枢表面分为三等份,每相占一份,则每相所占的区域为  $\frac{360^\circ}{m} = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$ ,故称为  $120^\circ$  相带。

由于  $60^\circ$  相带绕组的合成电动势比  $120^\circ$  相带的大,故除了单绕组变极电机外,一般都采用  $60^\circ$  相带绕组。

(1) 按  $60^\circ$  相带分相。对于  $60^\circ$  相带的电机,每极每相槽数

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{2 \times 2 \times 3} = 3$$

根据分相原则和每极每相槽数  $q$ ,就可在槽电动势星形图(见图 4-2(a))上进行分相。

以 A 相为例,由于  $q = 3$ ,A 相在每个极下应占有 3 个槽。在第一对极距范围内,如果在  $S_1$  极下将 1、2、3 这 3 个槽划归 A 相,在旁边标以字母 A,称极相组 A,如图 4-2(a) 所示。为了使每相合成电动势最大,应把在  $N_1$  极下,而且分别与 1、2、3 这 3 个槽相隔  $180^\circ$  电角度的 10、11、12 这 3 个槽也划归 A 相,在旁边标以字母 X,称为极相组 X。类似地,把第二对极距范围内的 19、20、21 和 28、29、30 等 6 个槽也划归 A 相。

同理,为了使三相绕组对称,应将距 A 相  $120^\circ$  处的 7、8、9、16、17、18 和 25、26、27、34、35、36 等槽划归 B 相,而将距 A 相  $240^\circ$  处的 13、14、15、22、23、24 和 31、32、33、4、5、6 等槽划归 C 相。

(2) 按  $120^\circ$  相带分相。对于  $120^\circ$  相带的电机,每极每相槽数

$$q = \frac{Q}{pm} = \frac{36}{2 \times 3} = 6$$

根据分相原则和每极每相槽数  $q = 6$ ,就可在槽电动势星形图上进行分相,从而得到一个三相对称的  $120^\circ$  相带绕组,如图 4-2(b) 所示。

**4-2** 为什么极相组 A 和极相组 X 串联时必须反接?如果正接将引起什么后果?

**答** 由于极相组 A 与极相组 X 相隔  $180^\circ$  电角度,分别位于极性不同的磁极下,所以极相组 A 与极相组 X 产生的感应电动势大小相等、方向相反。将极相组 A 与极相组 X 反接以后,其合成电动势为两者的代数和,其值为最大。如果将极相组 A 与极相组 X 正接,则两个极相组产生的感应电动势相互抵消,将会使其合成电动势为零。

**4-3** 有一个三相双层绕组,  $Q = 48, 2p = 4, y_1 = \frac{10}{12}\tau$ , 试分别画出支路数  $a = 1$  时:

- (1) 叠绕组的展开图(A相);
- (2) 波绕组的展开图(A相);
- (3) 支路数  $a = 2$  时叠绕组的接线图(A相)。

**解** 
$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{48}{4 \times 3} = 4$$

所以每个极相组由 4 个线圈构成。

因为 
$$\tau = \frac{Q}{2p} = \frac{48}{4} = 12$$

所以 
$$y_1 = \frac{10}{12}\tau = \frac{10}{12} \times 12 = 10$$

根据  $Q = 48, 2p = 4, y_1 = 10, q = 4$  可以分别画出:  $a = 1$  时的叠绕组展开图(A相),如图 4-3 所示;  $a = 1$  时的波绕组展开图(A相),如图 4-4 所示;  $a = 2$  时的叠绕组接线图(A相),如图 4-5 所示。

**4-4** 交流绕组的感应电动势公式是如何导出的?它与变压器的电动势公式有何类似和不同之处?

**答** 交流绕组的感应电动势公式是按以下步骤导出的。

(1) 一根导体的感应电动势。在正弦分布磁场下,导体感应电动势为一正弦波,其最大值为

$$E_{1m} = B_m l v$$

式中:  $B_m$  为正弦波磁通密度的幅值;  $l$  为导体的有效长度;  $v$  为导体与磁场相对运动的线速度(m/s),  $v = \frac{2p\tau}{60}n$ 。

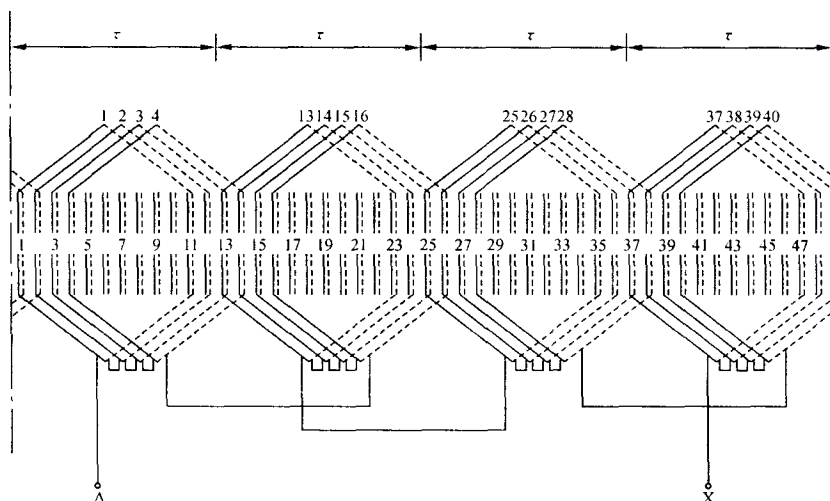


图 4-3 三相双层叠绕组展开图(A相)

$$2p = 4; Q = 48; a = 1$$

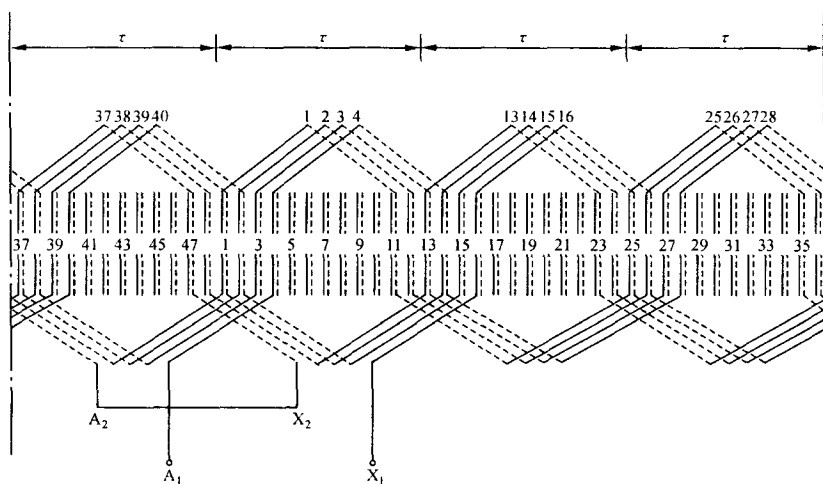


图 4-4 三相双层波绕组展开图(A相)

$$2p = 4; Q = 48; a = 1$$

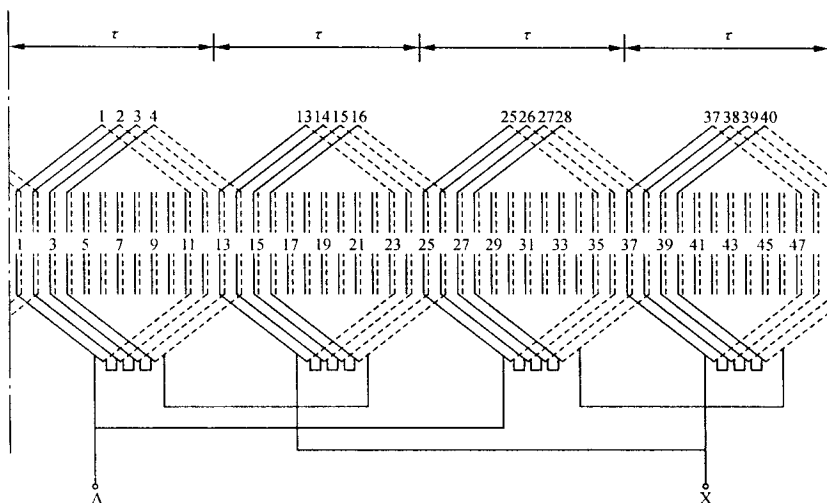


图 4-5 三相双层叠绕组展开图(A相)

$$2p = 4; Q = 48; a = 2$$

导体感应电动势的有效值为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{B_m l v}{\sqrt{2}} = \frac{B_m l}{\sqrt{2}} \frac{2p\tau n}{60} = \sqrt{2} \frac{pn}{60} B_m l \tau$$

$$= \sqrt{2} f B_m l \tau$$

式中:  $\tau$  为用长度表示的极距;  $f$  为导体感应电动势的频率。

当磁通密度按正弦分布时, 每极磁通  $\Phi_1 = \frac{2}{\pi} B_m \tau l$ , 故得  $B_m \tau l =$

$\frac{\pi}{2} \Phi_1$ , 代入上式可得

$$E_1 = \sqrt{2} f \frac{\pi}{2} \Phi_1 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} f \Phi_1 = 2.22 f \Phi_1$$

式中:  $E_1$  为一根导体的感应电动势(V);  $f$  为频率(Hz);  $\Phi_1$  为基波的每极磁通(Wb)。

(2) 整距线圈的电动势。整距线圈的节距  $y_1 = \tau$ , 即整距线圈的两个有效边在空间相隔一个极距  $\tau$ 。若线圈为单匝, 则一根导体位于 N 极下最大磁密处时, 另一根导体位于 S 极下最大磁密处。两根导体中的感

应电动势的瞬时值总是大小相等、方向相反,即两根导体中的感应电动势在相位上相差  $180^\circ$ ,将该两根导体构成一个单匝整距线圈后,其合成电动势为两者的代数和,故单匝整距线圈感应电动势的有效值为

$$E_{cl(N_c=1)} = 2E_1 = 4.44f\Phi_1$$

若线圈有  $N_c$  匝,则整距线圈感应电动势的有效值为

$$E_{cl} = 4.44fN_c\Phi_1$$

(3) 短距线圈的电动势。短距线圈的节距  $y_1 < \tau$ 。若线圈为单匝,则两根导体中的感应电动势在相位上不是相差  $180^\circ$ ,而是相差  $\gamma$  角度, $\gamma$  是用电角度表示的线圈节距,  $\gamma = \frac{y_1}{\tau}180^\circ < 180^\circ$ ,所以,将该两根导体构成一个单匝短距线圈后,其合成电动势应为两者的相量和,而不能代数相加,故单匝短距线圈感应电动势的有效值为

$$E_{cl(N_c=1)} = 2E_1 \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = 4.44fk_{p1}\Phi_1$$

式中: $k_{p1}$  为线圈的基波节距因数(又称短距系数)。它表示线圈短距后,其感应电动势比整距时所打的折扣。

若线圈为  $N_c$  匝,则短距线圈感应电动势的有效值为

$$E_{cl} = 4.44fN_c k_{p1}\Phi_1$$

(4) 分布绕组的电动势。已知一个极相组(又称线圈组)由  $q$  个线圈串联组成,每个线圈感应电动势的有效值  $E_{cl}$  均相等。如果  $q$  个线圈为集中线圈,则  $q$  个线圈的感应电动势相位相同,其合成电动势为  $q$  个线圈的感应电动势的代数和,即  $q$  个集中线圈的合成电动势为  $qE_{cl}$ 。若  $q$  个线圈为分布线圈,则相邻两线圈的感应电动势相位相差  $\alpha$  角,其合成电动势应为  $q$  个线圈的感应电动势的相量和,而不是代数和,故  $q$  个分布线圈的合成电动势的有效值为

$$E_{q1} = qE_{cl} \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = qE_{cl} k_{d1}$$

式中: $k_{d1}$  为线圈的基波分布因数。它表示分布关系使线圈组的电动势比集中绕组的小些,应打  $k_{d1}$  的折扣。

将  $E_{c1} = 4.44 f N_c k_{p1} \Phi_1$  代入上式, 可得一个极相组(线圈组)的感应电动势的有效值为

$$\begin{aligned} E_{q1} &= q \times 4.44 f N_c k_{p1} \Phi_1 k_{d1} = 4.44 f q N_c k_{p1} k_{d1} \Phi_1 \\ &= 4.44 f q N_c k_{w1} \Phi_1 \end{aligned}$$

式中:  $k_{w1}$  为绕组的基波绕组因数。它表示既计及短距, 又计及分布影响时, 整个绕组的合成电动势应打的总折扣。

(5) 相电动势。把一相所串联的线圈组电动势相加就得相电动势。如果每相有  $a$  条并联支路, 则  $a$  条支路的感应电动势应同大小、同相位, 因此不会产生环流, 这时相电动势等于每一条支路的电动势。在一般情况下, 每条支路所串联的各线圈组的电动势都是同大小、同相位, 可以直接相加, 因此无论是双层绕组还是单层绕组, 相电动势均为

$$E_{\phi 1} = 4.44 f N k_{w1} \Phi_1$$

式中:  $N$  为每相绕组的串联匝数(即一条支路的匝数)。

由于双层绕组每相有  $2p$  个线圈组, 单层绕组每相有  $p$  个线圈组, 故当并联支路数为  $a$  时: 对于双层绕组,  $N = \frac{2p}{a} q N_c$ ; 对于单层绕组,  $N = \frac{p}{a} q N_c$ 。

交流绕组感应电动势的计算公式与变压器感应电动势的计算公式相似, 只不过由于交流电机采用短距和分布绕组, 公式中多乘了一个绕组系数而已。

**4-5 试述分布因数和节距因数的含义。为什么分布因数和节距因数只能小于或等于 1?**

**答** (1) 分布因数  $k_{d1}$ 。分布因数的含义可以这样来理解: 假如  $q$  个线圈不是分布在  $q$  个不同的槽内, 而是集中在同一槽内(称为集中绕组), 这时每个线圈中感应电动势  $E_{c1}$  的相位是相同的,  $q$  个串联线圈的电动势是每个线圈电动势的  $q$  倍, 即  $qE_{c1}$ 。现在  $q$  个线圈分布在不同槽内, 各线圈的电动势的相位是不相同的, 它们的合成电动势比集中绕组的合成电动势小。把分布绕组的合成电动势与集中绕组的合成电动势之比称为分布因数, 即

$$k_{d1} = \frac{\text{分布绕组合成电动势}}{\text{集中绕组合成电动势}} = \frac{E_{q1}}{qE_{c1}} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

因为分布绕组的合成电动势  $E_{q1}$  是各绕组电动势的相量和,而集中绕组的合成电动势  $qE_{c1}$  是各绕组电动势的代数和,所以  $E_{q1} \leq qE_{c1}$ ,即分布因数  $k_{d1}$  只能小于或等于 1。

(2) 节距因数  $k_{p1}$ 。整距线圈每一匝的两根导体(又称有效导体或有效边)在空间相隔一个极距,也就是相隔  $180^\circ$  电角度。当一根导体处在 N 极的最大磁密处时,另一根导体刚好处在 S 极的最大磁密处。所以这两根导体的电动势总是大小相等而方向相反,其合成电动势是两者的代数和。短距线圈每一匝的两根导体在空间的距离比整距线圈的缩短了  $\beta (= \frac{\tau - y_1}{\tau} \times 180^\circ)$ ,即相距  $(180^\circ - \beta)$  电角度,因此,两根导体中感应电动势在时间相位上也相差  $(180^\circ - \beta)$  电角度,其合成电动势是两者的相量和。故短距线圈的合成电动势比整距线圈的合成电动势小。把短距线圈的电动势与整距线圈的电动势之比称为节距因数,即

$$k_{p1} = \frac{\text{短距线圈电动势}}{\text{整距线圈电动势}} = \frac{E_{c1(y_1 < \tau)}}{E_{c1(y_1 = \tau)}} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ$$

节距因数  $k_{p1}$  代表线圈短距后感应电动势比整距时应打的折扣系数。

很明显,除整距时  $k_{p1} = 1$  以外,不管是短距( $y_1 < \tau$ )还是长距( $y_1 > \tau$ ),总有节距因数  $k_{p1} < 1$ 。由于长距线圈端接部分较长,用铜量较多,所以一般很少采用。

4-6 什么叫一阶齿谐波?试证明齿谐波的节距因数和分布因数分别与基波的节距因数和分布因数相等(数值上)。

答 在高次谐波中,有一种  $\nu = \frac{Q}{p} \pm 1 = 2mq \pm 1$  次的谐波,称为一阶齿谐波。这种谐波有两个特点:一是这种谐波的次数与一对极下的槽数  $\frac{Q}{p}$  之间具有特定的关系;二是这种谐波的绕组因数恰好与基波的绕组因数相等,即

$$k_{w\nu(2mq \pm 1)} = \pm k_{w1}$$

因为

$$\begin{aligned} k_{p\nu(2mq \pm 1)} &= \sin[(2mq \pm 1) \frac{y_1}{\tau} 90^\circ] = \sin\left(y_1 180^\circ \pm \frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right) \\ &= \pm \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = \pm k_{p1} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 k_{dv(2mq \pm 1)} &= \frac{\sin \left[ (2mq \pm 1) \frac{q\alpha}{2} \right]}{q \sin \left[ (2mq \pm 1) \frac{\alpha}{2} \right]} = \frac{\sin \left( q180^\circ \pm \frac{q\alpha}{2} \right)}{q \sin \left( 180^\circ \pm \frac{\alpha}{2} \right)} \\
 &= \pm \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \pm k_{d1}
 \end{aligned}$$

式中:  $\alpha$  为槽距电角;  $\tau$  为极距;  $y_1$  为线圈的节距,  $y_1$  和  $\tau$  皆用槽数表示。

从上面两式中不难看出, 所有的  $k \frac{Q}{p} \pm 1 = k2mq \pm 1$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ , 为整数) 次谐波的绕组系数的数值大小都与基波绕组系数  $k_{w1}$  的数值大小相等, 都具有上述特性, 因此把它们都称为齿谐波。这样, 齿谐波的次数为

$$\nu_z = k \frac{Q}{p} \pm 1 = k2mq \pm 1$$

式中:  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ , 为整数。

当  $k = 1$  时,  $\nu_z = \frac{Q}{p} \pm 1 = 2mq \pm 1$ , 称为基本齿谐波或一阶齿谐波;

当  $k = 2$  时,  $\nu_z = 2 \frac{Q}{p} \pm 1 = 4mq \pm 1$ , 称为二阶齿谐波; 余类推。

#### 4-7 试述谐波电动势和齿谐波电动势的产生原因。

**答** 在实际电机中, 由于磁极磁场(又称气隙磁场)并非完全按正弦规律分布, 因此, 定子绕组内的感应电动势也不完全是正弦波形, 即除了正弦波形的基波外, 还包含着一系列谐波。

例如, 在凸极同步电机中, 磁极磁场沿电枢表面的分布一般呈平顶波形。应用傅里叶级数可将其分解为基波和一系列高次谐波。如果磁极制造没有特殊缺陷, N极下的磁密分布波和S极下的磁密分布波是对称的, 同时, 每极下磁密波对磁极中心线也是对称的。在此条件下, 磁密的空间谐波中就只有奇次波, 即  $\nu = 1, 3, 5, 7, 9, \dots, 2n+1$ 。谐波磁场会因转子旋转而形成旋转磁场, 故在定子绕组内会感应出高次谐波电动势。由此可见, 谐波电动势是因磁极磁场(又称气隙磁场)非正弦分布所引起的。

对同步发电机空载电动势进行谐波分析表明,电动势的高次谐波中,次数为 $\frac{Q}{p} \pm 1 = 2mq \pm 1$  ( $Q$  为定子槽数,  $p$  为极对数,  $m$  为相数) 的谐波电动势较强,这种谐波电动势比较强的主要原因是定子槽开口会引起气隙磁导不均匀(齿下气隙较小,磁导较大,而槽口气隙较大、磁导较小),故称这种谐波电动势为齿谐波电动势。齿谐波电动势是定子铁心上开槽引起的(定子铁心上开槽,会使气隙磁密的分布受到影响)。

4-8 试述抑制谐波电动势(包括齿谐波电动势)的方法。

答 (1) 抑制谐波电动势有以下几种方法。

① 改善磁极的极靴外形(凸极同步电机)或励磁绕组的分布范围(隐极同步电机),使主极磁场的分布接近于正弦波。对于凸极同步电机,采用非均匀气隙,一般取最大气隙 $\delta_{\max}$ 与最小气隙 $\delta_{\min}$ 之比在1.5~2.0范围内,极靴宽 $b_p$ 与极距 $\tau$ 之比在0.70~0.75范围内,如图4-6(a)所示;对于隐极同步电机,气隙是均匀的,一般把每极范围内安放励磁绕组部分的距离与极距之比设计在0.70~0.80范围内,如图4-6(b)所示。实践表明,在采取上述措施后,同步电机主磁极磁场的波形比较接近于正弦波。

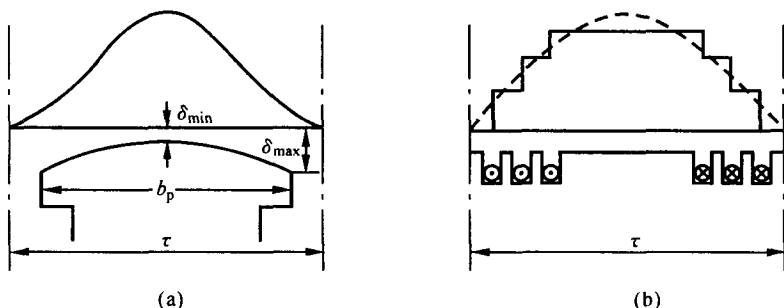


图 4-6 凸极同步电机的极靴外形和隐极同步电机的励磁绕组的布置

(a) 凸极同步电机; (b) 隐极同步电机

② 利用三相对称绕组的联结来消除线电动势中的3次及3的倍数次谐波。在相电动势中,各相的3次谐波在相位上彼此相差 $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ ,

即它们是同相位、同大小的。当三相绕组采用 Y 联结时,线电动势为两相电动势的相量差,所以相电动势中的 3 次谐波电动势互相抵消,发电机输出的线电动势中不存在 3 次谐波,同理也不存在 3 的倍数次奇次谐波。当三相绕组采用  $\Delta$  联结时,由于三相的 3 次谐波电动势同相位、同大小,即  $\dot{E}_{A3} = \dot{E}_{B3} = \dot{E}_{C3} = \dot{E}_{43}$ ,三相的 3 次谐波电动势之和  $3\dot{E}_{43}$  将在闭合的三角形中形成环流  $\dot{I}_{3\Delta}$ 。由于 3 次谐波电动势  $\dot{E}_{43}$  正好等于 3 次谐波环流  $\dot{I}_{3\Delta}$  所引起的阻抗压降  $\dot{I}_{3\Delta} Z_3$ ,所以线电压中不会出现 3 次谐波,同理,也不会出现 3 的倍数次谐波。

③ 采用短距绕组。适当地选择线圈的节距,使得某一次谐波的节距因数等于或接近于零,即可达到消除或削弱该次谐波的目的。一般说来,当选取线圈节距  $y_1 = \left(1 - \frac{1}{\nu}\right)\tau$ ,即节距缩短  $\nu$  次谐波的一个极距  $\left(\frac{1}{\nu}\tau\right)$  时,就能消除  $\nu$  次谐波电动势。实际上,由于三相绕组采用 Y 或  $\Delta$  联结,线电压中已经消除了 3 次及 3 的倍数次谐波,所以选择绕组节距时主要考虑同时削弱 5 次和 7 次谐波电动势,因此,通常采用  $y_1 \approx \frac{5}{6}\tau$ ,这时 5 次和 7 次谐波电动势差不多都削弱到只有原来的 1/4。

④ 采用分布绕组。从数学分析中可以发现,当电机的每极每相槽数  $q$  增加时,基波的分布因数  $k_{d1}$  下降不多,但高次谐波的分布因数却显著减小。因此,采用分布绕组可以削弱高次谐波电动势。

(2) 抑制齿谐波电动势有以下几种方法。

① 采用磁性槽楔或半闭口槽,以减小槽开口引起的气隙磁导变化。半闭口槽一般用于小型电机,磁性槽楔一般用在中型电机中。

② 采用斜槽。这种方法用在中小型感应电机及小型同步电机中,一般槽要斜一个定子齿距。斜槽以后,因为同一根导体内各个小段在磁场中的位置互不相同,所以,同一根导体内各个小段所感应的齿谐波电动势相位不同,可以大部分互相抵消而使导体总电动势中的齿谐波大为削弱。这时同一根导体各个小段所处的基波以及其他谐波气隙磁通密度也都不同了,由此,与直槽时相比,基波以及其他谐波电动势也都相应地有所减小。

③ 采用分数槽绕组。分数槽绕组是每极每相槽数  $q$  为一分数的绕组。事实上,由于每极下每相所占的槽数只能是整数,不能是分数,因此,分数槽绕组就是每相在每极下所占的槽数不相等,有的极下多一个槽,有的极下少一个槽,而  $q$  是一个平均值。因此,各个线圈组在磁极下处于不同的相对位置,各个线圈组内的齿谐波电动势不同相位,各线圈组的总齿谐波电动势是各线圈磁动势的相量和,可以大部分互相抵消,使相绕组中的齿谐波电动势大为削弱。

4-9 为什么交流发电机的定子绕组一般都采用 Y 联结?

答 由习题 4-8 可知,在对称的三相绕组中,无论采用 Y 联结或  $\Delta$  联结,交流发电机输出的线电压中都不存在 3 次及 3 的倍数次谐波,这是三相绕组在电动势方面的优点。但当采用  $\Delta$  联结时,闭合回路中的 3 次谐波环流会引起附加损耗,使电机效率降低、温升增加,所以交流发电机的定子绕组一般都采用 Y 联结。

4-10 有一台两极电机,定子表面有两根导体,其有效长度为  $l$ ,两根导体相距  $\alpha$  电角度,转子的主磁极在气隙中形成正弦分布的气隙磁场,转子转速为  $n$ ,极距为  $\tau$ 。试求:

- (1) 这两根导体中感应电动势的幅值和相位的关系;
- (2) 分别写出两根导体中感应电动势瞬时值的表达式;
- (3) 若把这两根导体组成一匝线圈,写出线圈感应电动势的瞬时值的表达式。

解 (1) 两根导体中感应电动势的幅值和相位的关系。

当气隙磁场的磁通密度  $B_s$  在空间按正弦波分布时,设其最大磁通密度为  $B_{m1}$ ,则

$$B_s = B_{m1} \sin \omega t$$

当导体和气隙磁场作相对运动时,导体切割气隙磁场产生感应电动势,则此感应电动势为

$$e_1 = B_s lv = B_{m1} lv \sin \omega t = E_{1m} \sin \omega t$$

式中:  $E_{1m} = B_{m1} lv$  为导体电动势最大值;  $v$  为导体切割磁力线的线速度,当磁场转速为  $n(\text{r/min})$  时,  $v = \frac{2\pi r}{60} n = 2\tau f$ 。

所以导体电动势的有效值为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{B_{m1} l v}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f B_{m1} l \tau$$

式中:  $\tau$  为用长度表示的极距;  $f$  为电动势的频率。

又因为正弦波磁通密度的平均值为

$$B_{av} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau B_{m1} \sin x dx = \frac{2}{\pi} B_{m1}$$

每极磁通

$$\Phi_1 = B_{av} \tau l$$

将以上各式整理,得

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi f \Phi_1 = 2.22 f \Phi_1$$

已知两根导体相距  $\alpha$  电角度,设导体 B 滞后导体 A,则两根导体中感应电动势的幅值相等,相位相差  $\alpha$  电角度,即

$$E_{1mA} = E_{1mB} = E_{1m}$$

$$E_{1A} = E_{1B} = E_1$$

$$\dot{E}_{1A} = E_1 \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_{1B} = E_1 \angle -\alpha$$

(2) 分别写出两根导体中感应电动势瞬时值的表达式。

因为主极磁场的气隙磁密沿圆周按正弦规律分布,所以导体中感应电动势也随时间变化而按正弦规律变化。以  $\dot{E}_{1A}$  为参考相量,并考虑到  $\dot{E}_{1B}$  滞后  $\dot{E}_{1A}$   $\alpha$  电角度,故两根导体中感应电动势瞬时值的表达式为

$$e_{1A} = E_{1m} \sin \omega t$$

$$e_{1B} = E_{1m} \sin(\omega t - \alpha)$$

(3) 若把这两根导体组成一匝线圈,写出线圈感应电动势瞬时值的表达式。

已知  $\dot{E}_{1B}$  滞后  $\dot{E}_{1A}$   $\alpha$  电角度,若将导体 A 与导体 B 构成一匝线圈,则由图 4-7 可知,线圈的电动势

$$\dot{E}_{clAB} = \dot{E}_{1A} - \dot{E}_{1B} = \dot{E}_{1A} + (-\dot{E}_{1B})$$

其有效值为

$$E_{clAB} = 2E_{1A} \cos \frac{180^\circ - \alpha}{2} = 2E_{1A} \cos \left( 90^\circ - \frac{\alpha}{2} \right)$$

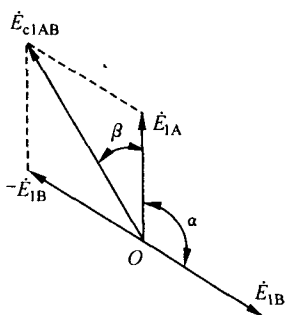


图 4-7 线圈电动势的计算

由图 4-7 可知,线圈电动势  $E_{clAB}$  超前  $E_{1A}$   $\beta$  电角度,即

$$\beta = \frac{1}{2}(180^\circ - \alpha) = 90^\circ - \frac{\alpha}{2}$$

因为导体 A 中的感应电动势  $E_{1A}$  与导体 B 中的感应电动势  $E_{1B}$  的幅值相等、频率相同,仅相位相差  $\alpha$  电角度。所以,其所构成的线圈的电动势  $E_{clAB}$  的幅值恒定,  $E_{clAB}$  的频率与  $E_{1A}$  的频率相同,故线圈中的感应电动势瞬时值的表

达式为

$$\begin{aligned} e_{clAB} &= \sqrt{2}E_{clAB} \sin(\omega t + \beta) \\ &= 2\sqrt{2}E_{1A} \cos \left( 90^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) \sin \left( \omega t + 90^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) \end{aligned}$$

**4-11** 试计算下列三相两极 50 Hz 的同步发电机定子的基波绕组因数和空载相电动势、线电动势。已知定子槽数  $Q = 48$ , 每槽内有两根导体, 支路数  $a = 1$ ,  $y_1 = 20$ , 绕组为双层、Y 联结, 基波磁通  $\Phi_1 = 1.11$  Wb。

**解** (1) 基波绕组因数。

① 每极每相槽数

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{48}{2 \times 3} = 8$$

② 槽距电角

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q} = \frac{1 \times 360^\circ}{48} = 7.5^\circ$$

③ 极距

$$\tau = \frac{Q}{2p} = \frac{48}{2} = 24$$

④ 基波节距因数

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{20}{24} \times 90^\circ\right) = 0.966$$

## ⑤ 基波分布因数

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{8 \times 7.5^\circ}{2}}{8 \sin \frac{7.5^\circ}{2}} = 0.9556$$

## ⑥ 基波绕组因数

$$k_{w1} = k_{p1} \times k_{d1} = 0.966 \times 0.9556 = 0.923$$

## (2) 基波空载相电动势和线电动势。

① 每相串联匝数  $N$ 。因为每槽有两根导体，所以定子槽内共有  $2Q = 2 \times 48 = 96$  根导体。因为两根导体构成一匝线圈，所以定子绕组共有  $96/2 = 48$  匝。

已知定子绕组为三相，并联支路数  $a = 1$ ，所以每相串联匝数，即每相每条支路的匝数

$$N = \frac{48}{ma} = \frac{48}{3 \times 1} = 16$$

## ② 基波相电动势

$$E_{\phi 1} = 4.44 f N k_{w1} \Phi_1 = 4.44 \times 50 \times 16 \times 0.923 \times 1.11 \text{ V} = 3639 \text{ V}$$

## ③ 基波线电动势

$$E_{L1} = \sqrt{3} E_{\phi 1} = \sqrt{3} \times 3639 \text{ V} = 6303 \text{ V}$$

**4-12** 有一个三相双层绕组， $Q = 36$ ， $2p = 4$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ ， $y_1 = \frac{7}{9}\tau$ ，试求基波，5次、7次谐波和一阶齿谐波的绕组因数。若绕组为Y联结，每个线圈有2匝，基波磁通  $\Phi_1 = 0.74 \text{ Wb}$ ，谐波磁场与基波磁场之比  $B_5/B_1 = 1/25$ ， $B_7/B_1 = 1/49$ ，每相只有一条支路，试求基波，5次和7次谐波的相电动势值。

**解** (1) 基波，5次、7次谐波和一阶齿谐波的绕组因数。

$$\text{① 每极每相槽数 } q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

$$\text{② 槽距电角 } \alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

③ 极距  $\tau = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{4} = 9$

④ 线圈节距  $y_1 = \frac{7}{9}\tau = \frac{7}{9} \times 9 = 7$

⑤ 节距因数  $k_{p1}$ 、 $k_{p5}$ 、 $k_{p7}$  分别为

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{7}{9} \times 90^\circ\right) = 0.94$$

$$k_{p5} = \sin\left(\nu \frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ\right) = \sin\left(5 \times \frac{7}{9} \times 90^\circ\right) = -0.1736$$

$$k_{p7} = \sin\left(\nu \frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ\right) = \sin\left(7 \times \frac{7}{9} \times 90^\circ\right) = 0.766$$

⑥ 分布因数  $k_{d1}$ 、 $k_{d5}$ 、 $k_{d7}$  分别为

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 20^\circ}{2}}{3 \times \sin \frac{20^\circ}{2}} = 0.96$$

$$k_{d5} = \frac{\sin\left(\nu \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\nu \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(5 \times \frac{3 \times 20^\circ}{2}\right)}{3 \times \sin\left(5 \times \frac{20^\circ}{2}\right)} = 0.2176$$

$$k_{d7} = \frac{\sin\left(\nu \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\nu \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(7 \times \frac{3 \times 20^\circ}{2}\right)}{3 \times \sin\left(7 \times \frac{20^\circ}{2}\right)} = -0.1774$$

⑦ 绕组因数  $k_{w1}$ 、 $k_{w5}$ 、 $k_{w7}$  分别为

$$k_{w1} = k_{p1} k_{d1} = 0.94 \times 0.96 = 0.902$$

$$k_{w5} = k_{p5} k_{d5} = -0.1736 \times 0.2176 = -0.038$$

$$k_{w7} = k_{p7} k_{d7} = 0.766 \times (-0.1774) = -0.136$$

因为

$$k_{w\nu(\nu=2mq\pm1)} = \pm k_{w1}$$

所以

$$k_{w\nu(\nu=2 \times 3 \times 3 + 1)} = k_{w19} = -k_{w1} = -0.902$$

$$k_{w\nu(\nu=2 \times 3 \times 3 - 1)} = k_{w17} = k_{w1} = 0.902$$

(2) 基波、5次和7次谐波的相电动势值。

① 每相串联匝数  $N$ 。因为双层绕组中线圈的个数等于定子槽数  $Q$ ，



已知每个线圈有2匝,所以整个电机全部线圈的匝数为 $2Q = 2 \times 36 = 72$ 匝。由于该电机绕组是三相对称绕组,每相只有一条支路,故每相串联匝数,即每相每条支路的匝数

$$N = \frac{72}{ma} = \frac{72}{3 \times 1} = 24$$

② 极距  $\tau$ 、 $\tau_5$  和  $\tau_7$ 。

$$\tau = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

因为

$$\tau_v = \frac{1}{\nu} \tau$$

所以

$$\tau_5 = \frac{1}{5} \tau, \quad \tau_7 = \frac{1}{7} \tau$$

③ 每极磁通  $\Phi_5$  和  $\Phi_7$ 。

$$\text{因为} \quad \frac{\Phi_5}{\Phi_1} = \frac{B_5 \tau_5 l}{B_1 \tau l} = \frac{B_5 \frac{1}{5} \tau l}{B_1 \tau l} = \frac{1}{5} \times \frac{B_5}{B_1} = \frac{1}{5} \times \frac{1}{25} = \frac{1}{125}$$

$$\text{所以} \quad \Phi_5 = \frac{1}{125} \Phi_1 = \frac{1}{125} \times 0.74 \text{ Wb} = 0.00592 \text{ Wb}$$

$$\text{因为} \quad \frac{\Phi_7}{\Phi_1} = \frac{B_7 \tau_7 l}{B_1 \tau l} = \frac{B_7 \frac{1}{7} \tau l}{B_1 \tau l} = \frac{1}{7} \times \frac{B_7}{B_1} = \frac{1}{7} \times \frac{1}{49} = \frac{1}{343}$$

$$\text{所以} \quad \Phi_7 = \frac{1}{343} \Phi_1 = \frac{1}{343} \times 0.74 \text{ Wb} = 0.002157 \text{ Wb}$$

④ 相电动势  $E_{\phi 1}$ 、 $E_{\phi 5}$  和  $E_{\phi 7}$ 。

$$E_{\phi 1} = 4.44 f N k_{w1} \Phi_1 = 4.44 \times 50 \times 24 \times 0.902 \times 0.74 \text{ V} = 3556 \text{ V}$$

$$\text{因为} \quad E_{\phi v} = 4.44 f_v N k_{wv} \Phi_v = 4.44 \nu f N k_{wv} \Phi_v$$

$$\begin{aligned} \text{所以} \quad E_{\phi 5} &= 4.44 \times 5 f N k_{w5} \Phi_5 \\ &= 4.44 \times 5 \times 50 \times 24 \times 0.038 \times 0.00592 \text{ V} \\ &= 5.99 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\phi 7} &= 4.44 \times 7 f N k_{w7} \Phi_7 \\ &= 4.44 \times 7 \times 50 \times 24 \times 0.136 \times 0.002157 \text{ V} \\ &= 10.94 \text{ V} \end{aligned}$$

4-13 为什么说交流绕组的磁动势既是时间函数又是空间函数?

答 交流电机电枢绕组产生的磁动势与直流电机相比,是较复杂

的。在分析磁动势的大小及波形等问题时,要从两大方面来考虑:首先考虑绕组在定子空间所在的位置,即所谓空间问题;再考虑该绕组流过的电流在时间上又是如何变化的,即所谓时间问题。现举例说明如下。

单层集中整距绕组是最简单的电机绕组。如图 4-8 所示的一台三相两极电机,定子上每相只有一个整距线圈,在图中只画出了 A 相绕组。

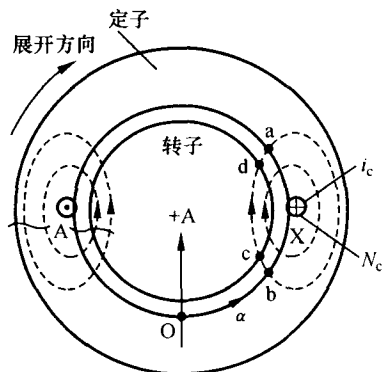


图 4-8 通入电流的一相整距线圈

当线圈 AX 中通入电流  $i_c$  时,如果线圈的匝数为  $N_c$ ,线圈中产生的磁动势就是  $N_c i_c$ ,它在电机内产生一个两极磁场,其磁感应线(磁力线)分布如图 4-8 所示。由于这是单个线圈产生的磁场,磁场中每个磁感应线回路所环链(又称匝链或交链)的安匝数相同,均为  $N_c i_c$ ,所以每个磁回路都具有相同的磁动势。选择其中的一个磁回路 abcd 来分析。如果把铁心磁路的磁阻都忽略不计,那么可以认为整个磁回路的磁动势  $N_c i_c$  都消耗在两个空气隙上,显然每个空气隙所消耗的磁动势等于整个磁路磁动势的一半,即为  $\frac{1}{2} N_c i_c$ 。由于 bc 段气隙中磁感应线方向是出定子进转子,规定为正值,而 da 段气隙中,磁感应线是出转子进定子,则规定为负值。这样 bc 段气隙磁路的磁动势为  $+\frac{1}{2} N_c i_c$ ,da 段气隙磁路的磁动势为  $-\frac{1}{2} N_c i_c$ 。对于任何一个磁回路,可以用上述同样的方法,找到该

磁回路上两个气隙磁动势的大小。

如果在电机的定子内表面上建立直角坐标系,设横坐标表示沿气隙圆周方向的距离,用空间电角度  $\alpha$  来衡量,选线圈 AX 的轴线 +A 处作为坐标的起点  $\alpha = 0$ ,纵坐标  $f$  表示气隙磁动势的大小,将电机图形展开成直线,如图 4-9 所示,转子在上部、定子在下部。则可以看到: $\alpha$  在  $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$  的范围内,气隙磁动势的方向均为出定子进转子,与规定的磁动势正方向一致,这个区域里的磁动势都为正; $\alpha$  在  $\frac{\pi}{2} \sim \frac{3\pi}{2}$  的范围内,气隙磁动势的方向均为出转子进定子,这个区域里的磁动势都为负。据此可在图 4-9 中画出气隙磁动势  $f$  沿  $\alpha$  方向的大小分布情况,从图中可以看出,通电线圈产生的磁动势是一个空间函数,即该磁动势沿圆周的分布是一个矩形波,在通电流的线圈处,磁动势发生了突变。

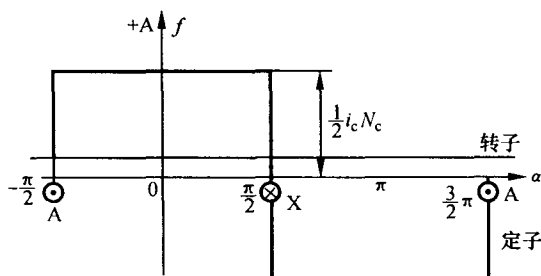


图 4-9 线圈磁动势沿圆周方向的空间分布

假如流过线圈中的电流  $i_c$  是直流电流,它的数值和方向都恒定不变,矩形波磁动势的高度也将恒定不变。然而在交流电机中,线圈中流过的是交变电流( $i_c = \sqrt{2}I_c \cos \omega t$ ),电流的大小和方向都随时间变化而变化,因此,矩形波磁动势的高度也将随时间变化而变化,即

$$f_c = \frac{1}{2} N_c i_c = \frac{1}{2} \sqrt{2} N_c I_c \cos \omega t = F_c \cos \omega t$$

$$F_c = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c$$

式中: $F_c$  为矩形波磁动势的最大高度。

由上式可以看出,在一个整距集中线圈里通过余弦变化的交流电流时,它所产生的矩形波磁动势的幅值将随着时间变化而作余弦变化,即通入交流电流的线圈产生的磁动势既是空间函数又是时间函数。

当  $\omega t = 0$ , 电流达最大值时, 矩形波磁动势的高度也达最大值  $F_c$ ; 当  $\omega t = 90^\circ$ , 电流为零时, 矩形波磁动势的高度也为零; 当电流为负值时, 磁动势也随着改变方向。矩形波磁动势随时间变化而变化的关系如图 4-10 所示, 从图中可以看出: 在任何瞬间, 磁动势在空间的分布为一矩形波; 在空间的任何一点, 磁动势的大小随时间  $t$  的变化按余弦规律脉振。通常称这种在空间位置固定, 而大小随时间变化而变化的磁动势为脉振磁动势。

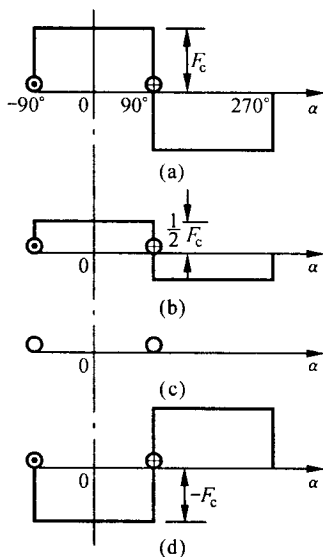


图 4-10 矩形波磁动势随时间变化

$$(a) \omega t = 0^\circ, f_c = F_c; (b) \omega t = 60^\circ, f_c = \frac{1}{2} F_c;$$

$$(c) \omega t = 90^\circ, f_c = 0; (d) \omega t = 180^\circ, f_c = -F_c$$

**4-14** 交流绕组产生的磁动势相加时, 为什么能用矢量运算? 有什么条件?

答 设有一个线圈组(又称极相组)由  $q = 3$  个线圈串联而成,如图 4-11(a) 所示。每个线圈产生的磁动势都是一个矩形波,把  $q$  个线圈所产生的矩形磁动势逐点相加,即可得到线圈组的合成磁动势。由于每个线圈的匝数相等,通过的电流亦相同,故各个线圈的磁动势具有相同的幅值。由于线圈位于槽中,故相邻线圈在空间彼此的位移角便是槽距电角  $\alpha$ ,所以各个矩形磁动势之间在空间亦相隔  $\alpha$  电角度。从图 4-11(a) 可见,把各个矩形波相加,所得合成磁动势乃是一个阶梯形波,如粗实线所示。

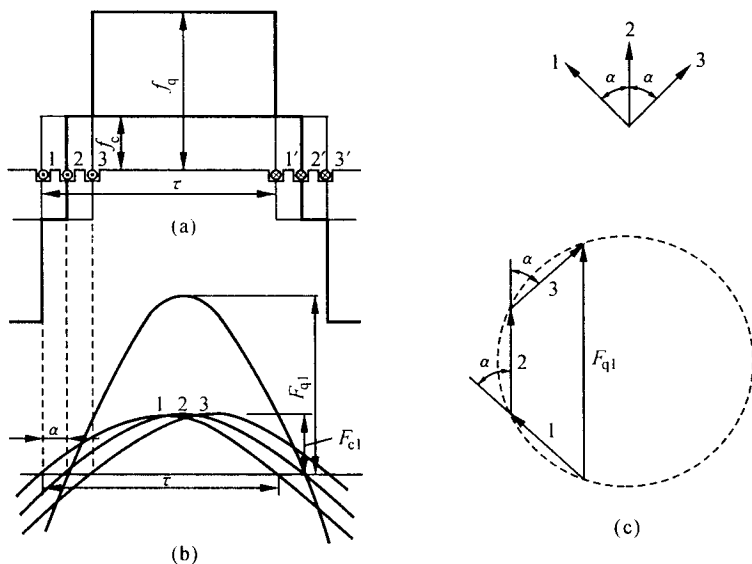


图 4-11 整距分布绕组的磁动势( $q = 3$ )

(a) 合成磁动势;(b) 基波合成磁动势;(c) 用空间矢量来求基波合成磁动势

由于矩形波可利用傅里叶级数分解为基波和一系列奇次谐波,其中基波之间在空间上的位移角也是  $\alpha$  电角度,如图 4-11(b) 所示,把  $q$  个线圈的基波磁动势逐点相加,就可求得基波合成磁动势。由于基波磁动势在空间按正弦规律分布,故可用空间矢量表示和运算。于是  $q$  个线圈的基波合成磁动势矢量,就等于各个线圈的基波磁动势矢量的矢量和,

如图 4-11(c) 所示。

因为交流绕组中各个线圈产生的矩形波磁动势可分解为基波和一系列高次谐波磁动势,其基波和一系列高次谐波磁动势均在空间按正弦规律分布,故基波和各种高次谐波均可分别用矢量表示和运算。

**4-15** 单相绕组的磁动势具有什么性质?它的幅值等于什么?

**答** 单相绕组的磁动势是脉振磁动势,该磁动势沿气隙圆周按梯形波分布,它可分解为基波和一系列高次谐波磁动势。基波和每个谐波磁动势都是空间位置不变,但波幅按同一频率而交变的脉振波,其脉振频率取决于电流的频率。对正常接法的绕组,相绕组磁动势的基波波幅必在相绕组的轴线(也即构成相绕组的线圈组的中心线)上,而各高次谐波则都必有一个波幅落在相绕组轴线上。

由于各对极下的磁动势和磁阻可组成一个对称分支磁路,所以一相绕组的磁动势就等于一个极相组的磁动势。

单相绕组基波磁动势的幅值为

$$F_{\phi 1} = 0.9 \frac{Nk_{w1}}{p} I_{\phi}$$

式中: $N$  为每相串联匝数(即每相每条支路的串联匝数); $I_{\phi}$  为相电流; $k_{w1}$  为基波绕组因素; $p$  为极对数。

$\nu$  次谐波磁动势的幅值为

$$F_{\phi \nu} = \frac{1}{\nu} \times 0.9 \frac{Nk_{w\nu}}{p} I_{\phi}$$

式中: $k_{w\nu}$  为  $\nu$  次谐波绕组因素。

**4-16** 三相基波旋转磁动势的幅值、转向和转速各取决于什么?为什么?

**答** (1) 三相基波合成磁动势的幅值。由于三相对称绕组在空间互差  $120^\circ$  电角度,所以各相基波磁动势在空间亦互差  $120^\circ$  电角度。若在对称的三相绕组中通入对称的三相电流,则各相的脉振磁动势在时间上亦将互相相差  $120^\circ$  电角度。把 A、B、C 三个单相基波脉振磁动势相加,即可得到三相绕组的基波合成磁动势,它是一个正弦分布、幅值恒定的圆形旋转磁动势,其幅值为单相脉振磁动势最大幅值的  $\frac{3}{2}$  倍。所

以,三相基波合成磁动势的幅值取决于三相绕组在空间的分布、三相电流的大小与相位和每相绕组脉振磁动势的幅值。

(2) 三相基波合成磁动势的转向。由于当某相电流达到最大值时,三相基波合成磁动势的幅值取在该相绕组的轴线上,故三相基波合成磁动势的转向,取决于三相绕组中电流的相序,即电流到达最大值时的顺序。也就是说,三相基波合成磁动势波的推移方向是从电流超前的相绕组轴线移向电流滞后的相绕组轴线的方向。可见,将任意两相的位置调换,使这两相通入的电流相序改变,就可使三相基波合成磁动势的旋转方向与原来的旋转方向相反。

(3) 三相基波合成磁动势的转速。因为当某相电流达到最大值时,三相基波合成磁动势的幅值取在该相绕组的轴线上,所以三相基波合成磁动势波推移的角速度与交流电流的角频率相等。由于一转为  $p2\pi$  弧度,所以用转速表示时,三相基波合成磁动势的转速  $n_s = \frac{\omega}{p2\pi} = \frac{f}{p}$  (r/s)  $= \frac{60f}{p}$  (r/min)。即三相基波合成磁动势的转速仅取决于电流的频率和电机的极对数。

#### 4-17 旋转磁动势与脉振磁动势之间有什么关系?

答 单相绕组通入交流电流产生一个脉振磁动势时,其基波磁动势的幅值为  $F_{\omega 1} = 0.9 \frac{Nk_{w1}}{p} I_*$ 。单相脉振磁动势可以分解为两个幅值相等、转向相反的圆形旋转磁动势。

在对称的三相绕组中通以对称的三相正序电流时,三相绕组中各自产生一个脉振磁动势,把各相脉振磁动势分解为对应的正向和反向推移的旋转磁动势,合成的结果使反向磁动势相互抵消,正向磁动势得到加强。于是基波合成磁动势即为正向推移的旋转磁动势,其幅值为  $F = \frac{3}{2} \times 0.9 \frac{Nk_{w1}}{p} I_*$ ,其转向为由超前电流的相绕组的轴线转向落后电流的相绕组的轴线的方向,其转速  $n_s = \frac{60f}{p}$  (r/min),当某相绕组电流达最大值时,基波旋转磁动势的幅值取在该相绕组的轴线上。

若在对称的三相绕组中通以负序电流,则各相脉振磁动势分解出

的3个正向旋转磁动势将相互抵消,于是基波合成磁动势转化为反向移动的旋转磁动势。

无论是脉振磁动势还是旋转磁动势,都是绕组中通以电流所产生的,故其磁动势的幅值均正比于每极下的有效安匝数,脉振或旋转的角频率均取决于电流的交变频率。

**4-18** 为什么用于计算交流绕组感应电动势的绕组因数,亦适用于计算磁动势?

**答** 由于矩形波磁动势可以利用傅里叶级数分解为基波磁动势和一系列高次谐波磁动势。而基波磁动势和一系列高次谐波磁动势均在空间按正弦规律分布,故可用空间矢量表示和运算。矢量的长度代表磁动势的幅值。

以一个线圈组的基波合成磁动势的计算(见图4-11)为例,其 $q$ 个线圈的基波合成磁动势矢量,就等于各个线圈的基波磁动势矢量的矢量和,如图4-11(c)所示。不难看出,利用矢量运算时,分布线圈基波磁动势的合成与基波电动势的合成完全相似,因此,同样可以引入分布因数 $k_{d1}$ 来表示线圈分布的影响。故用于计算交流绕组感应电动势的绕组因数,亦适用于计算磁动势。

**4-19** 试求习题4-11中的发电机通入额定电流时,一相和三相绕组所产生的基波磁动势幅值。发电机的额定功率为12000 kW,  $\cos\varphi_N = 0.8$ ,额定电压(线电压)为6.3 kV, Y联结。

**解** (1) 发电机的额定电流

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_N} = \frac{12000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3 \times 0.8} \text{ A} = 1374.68 \text{ A}$$

由于Y联结,故有

$$I_{N\phi} = I_N = 1374.68 \text{ A}$$

(2) 一相和三相绕组所产生的基波磁动势幅值为

$$F_{\phi 1} = 0.9 \frac{Nk_{w1}}{p} I_{N\phi} = 0.9 \times \frac{16 \times 0.923}{1} \times 1374.68 \text{ A} = 18271 \text{ A}$$

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} = \frac{3}{2} \times 18271 \text{ A} = 27407 \text{ A}$$

**4-20** 试求习题4-19的发电机通入基频额定电流时,一相和三相



绕组所产生的3次、5次、7次空间谐波磁动势的幅值、转速和转向。

解 (1) 3次谐波磁动势的幅值、转速和转向。

① 绕组因数  $k_{w3}$ 。

$$k_{p3} = \sin\left(3 \frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ\right) = \sin\left(3 \times \frac{20}{24} \times 90^\circ\right) = -0.707$$

$$k_{d3} = \frac{\sin\left(3 \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(3 \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(3 \times \frac{8 \times 7.5^\circ}{2}\right)}{8 \times \sin\left(3 \times \frac{7.5^\circ}{2}\right)} = 0.641$$

$$k_{w3} = k_{p3} k_{d3} = -0.707 \times 0.641 = -0.453$$

② 磁动势  $F_{\ast 3}$  和  $F_3$ 。

$$\begin{aligned} F_{\ast 3} &= \frac{1}{3} \times 0.9 \frac{Nk_{w3}}{p} I_{\ast} = \frac{1}{3} \times 0.9 \times \frac{16 \times 0.453}{1} \times 1374.68 \text{ A} \\ &= 2989.1 \text{ A} \end{aligned}$$

因对称三相绕组的合成磁动势中不存在3次及3的倍数次谐波磁动势,所以

$$F_3 = 0$$

(2) 5次谐波磁动势的幅值、转速和转向。

① 绕组因数  $k_{w5}$ 。

$$k_{p5} = \sin\left(5 \frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ\right) = \sin\left(5 \times \frac{20}{24} \times 90^\circ\right) = 0.259$$

$$k_{d5} = \frac{\sin\left(5 \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(5 \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(5 \times \frac{8 \times 7.5^\circ}{2}\right)}{8 \times \sin\left(5 \times \frac{7.5^\circ}{2}\right)} = 0.194$$

$$k_{w5} = k_{p5} k_{d5} = 0.259 \times 0.194 = 0.0502$$

② 磁动势  $F_{\ast 5}$  和  $F_5$ 。

$$\begin{aligned} F_{\ast 5} &= \frac{1}{5} \times 0.9 \frac{Nk_{w5}}{p} I_{\ast} = \frac{1}{5} \times 0.9 \times \frac{16 \times 0.0502}{1} \times 1374.68 \text{ A} \\ &= 198.7 \text{ A} \end{aligned}$$

$$F_5 = \frac{3}{2} F_{\ast 5} = \frac{3}{2} \times 198.7 \text{ A} = 298.05 \text{ A}$$

③ 转速  $n_5$  和转向。

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{1} \text{ r/min} = 3000 \text{ r/min}$$

$$n_5 = -\frac{1}{5}n_s = -\frac{1}{5} \times 3000 \text{ r/min} = -600 \text{ r/min}$$

5 次谐波合成磁动势的转向与基波合成磁动势的转向相反。

(3) 7 次谐波磁动势的幅值、转速和转向。

① 绕组因数  $k_{u7}$ 。

$$k_{p7} = \sin\left(7 \frac{y_1}{\tau} \times 90^\circ\right) = \sin\left(7 \times \frac{20}{24} \times 90^\circ\right) = 0.259$$

$$k_{d7} = \frac{\sin\left(7 \frac{qa}{2}\right)}{q \sin\left(7 \frac{a}{2}\right)} = \frac{\sin\left(7 \times \frac{8 \times 7.5^\circ}{2}\right)}{8 \times \sin\left(7 \times \frac{7.5^\circ}{2}\right)} = -0.141$$

$$k_{w7} = k_{p7} k_{d7} = 0.259 \times (-0.141) = -0.0365$$

② 磁动势  $F_{\psi 7}$  和  $F_7$ 。

$$\begin{aligned} F_{\psi 7} &= \frac{1}{7} \times 0.9 \frac{N k_{w7}}{p} I_\psi = \frac{1}{7} \times 0.9 \times \frac{16 \times 0.0365}{1} \times 1374.68 \text{ A} \\ &= 103.2 \text{ A} \end{aligned}$$

$$F_7 = \frac{3}{2} F_{\psi 7} = \frac{3}{2} \times 103.2 \text{ A} = 154.8 \text{ A}$$

③ 转速  $n_7$  和转向。

$$n_7 = \frac{1}{7} n_s = \frac{1}{7} \times 3000 \text{ r/min} = 428.6 \text{ r/min}$$

7 次谐波合成磁动势的转向与基波合成磁动势的转向相同。

**4-21** 试分析下列情况是否会产生旋转磁动势, 转向怎样?

(1) 对称两相绕组内通以对称两相正序电流(见图 4-12(a));

(2) 三相绕组一相(如 C 相)断线(见图 4-12(b))。

**答** (1) 对称两相绕组内通以对称两相正序电流(见图 4-12(a))。

已知对称两相绕组(绕组完全一样, 但空间位置相差  $90^\circ$  电角度)内通以对称两相正序电流, 电流有效值相等, 但在时间上相差  $90^\circ$  电角度。设在 A 相和 B 相中通入的电流分别为

$$i_A = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

$$i_B = \sqrt{2} I \cos(\omega t - 90^\circ)$$

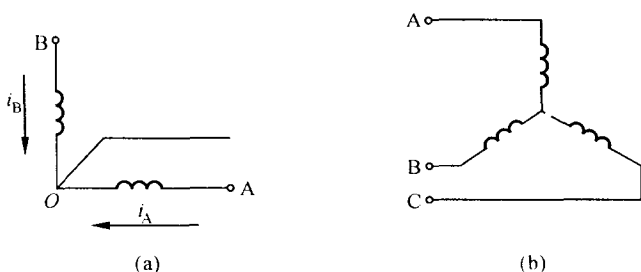


图 4-12 习题 4-21 的绕组

根据两个线圈通入电流的情况,它们产生的基波脉振磁动势分别为  $f_{A\phi 1}$  和  $f_{B\phi 1}$ :

$$f_{A\phi 1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$f_{B\phi 1} = F_{\phi 1} \cos(\omega t - 90^\circ) \cos(\alpha - 90^\circ)$$

把每个线圈的基波脉振磁动势用两个基波旋转磁动势表示,分别得

$$f_{A\phi 1} = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha)$$

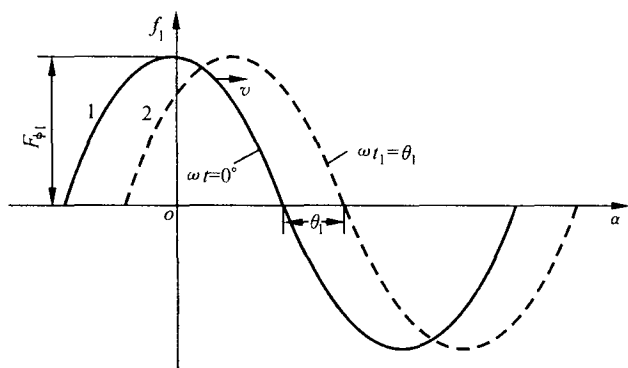
$$f_{B\phi 1} = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha - 180^\circ)$$

两个线圈产生的合成基波总磁动势

$$f_1 = f_{A\phi 1} + f_{B\phi 1} = F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha)$$

从上式可知,当  $t = 0$  (即  $\omega t = 0$ ) 时,  $f_1 = F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha) = F_{\phi 1} \cos(-\alpha)$ , 这表明:磁动势在空间作余弦分布,其最大值位于坐标原点,磁动势分布对应于图 4-13 中的曲线 1。当  $t = t_1$  (即  $\omega t_1 = \theta_1$ ) 时,  $f_1 = F_{\phi 1} \cos(\omega t_1 - \alpha) = F_{\phi 1} \cos(\theta_1 - \alpha)$ , 这表明,磁动势仍为幅值为  $F_{\phi 1}$  的余弦波,但其最大值出现在  $\theta_1$  处,亦即其最大值沿  $\alpha$  轴正方向向前推进了一个角度  $\theta_1$ ,  $\theta_1 = \omega t_1$ 。该时刻的磁动势分布对应于图 4-13 中的曲线 2。随着时间的推移,  $\theta_1$  不断增大,即磁动势不断地向  $+\alpha$  方向移动,所以上式表示一个恒幅、余弦分布的正向行波。由于定子内腔为圆柱形,所以,  $f_1$  沿气隙圆周的连续推移就成为旋转磁动势。

可见,对称两相绕组通以对称两相正序电流时,其基波合成磁动势是一个幅值为  $F_{\phi 1}$ , 以  $\omega$  角速度旋转的旋转磁动势,其旋转方向由电流

图 4-13  $\omega t = 0$  和  $\omega t_1 = \theta_1$  时磁动势的分布

超前相的绕组的轴线转向电流落后相的绕组的轴线的方向。

(2) 三相绕组一相(如 C 相)断线(见图 4-12(b))。

已知 A、B 两相绕组的轴线在空间相差  $120^\circ$  电角度,但是,在 C 相绕组断线后,流过 A、B 两相绕组的电流的相位相同(因为 A、B 两相成为串联绕组),没有相位差,所以相当于单相分布绕组通入单相交流电流,因此 A、B 两相绕组产生的合成磁动势是脉振磁动势。

**4-22** 试分析一个短距线圈内通过正弦交流电流所产生的磁动势(分布规律、基波幅值、谐波次数和幅值)。

**答** 图 4-14 所示为一个短距线圈嵌放在定子槽内的情况。线圈两边所跨的角度为  $y_c$  机械弧度,而整个圆周为  $2\pi$  机械弧度。当线圈内通以正弦交流电流  $i_c$  时,建立的磁场如图中虚线所示。从图可见,定子电流建立了一个两极磁场。

从全电流定律可知,每根磁力线(磁感应线)都包围着相同的电流,即

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum i = i_c N_c$$

式中:  $N_c$  为槽内导体数(即线圈的匝数);  $i_c$  为每根导体内的电流。从图 4-14 可见,  $i_c N_c$  是一对极的总磁动势。

图 4-14 所示线圈的磁动势沿气隙圆周的分布情况如图 4-15(a) 所示。

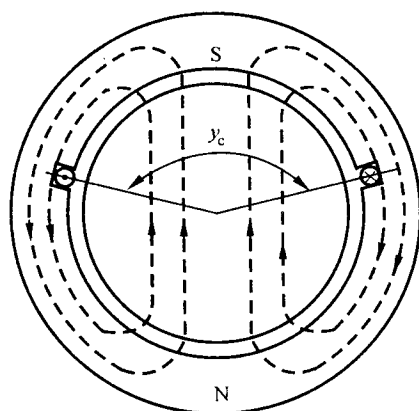


图 4-14 一个矩距线圈的磁动势建立的磁场

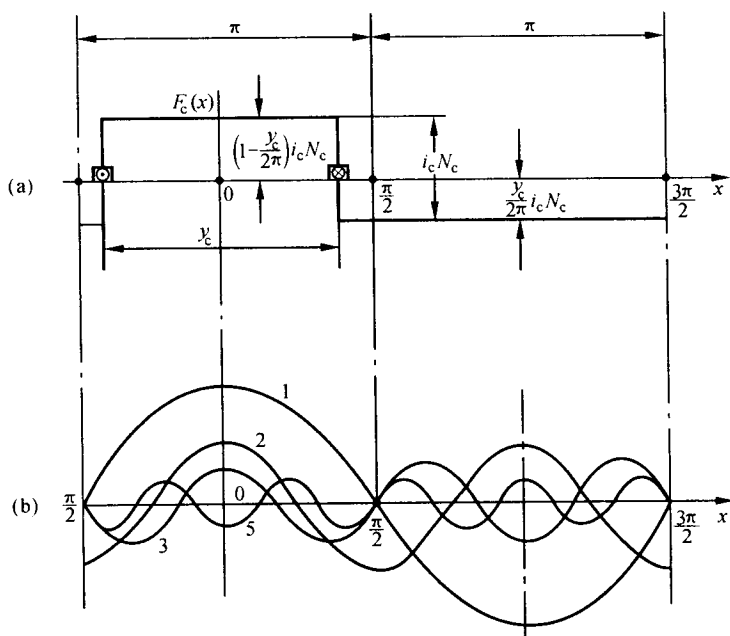


图 4-15 一个短距线圈的磁动势及其谐波分析

图中从正波顶到负波顶间的距离等于一对极的总磁动势  $i_c N_c$ ，而横坐标的位置是按横坐标上、下磁动势包围的面积相等这一原则来确定的。这是因为从 N 极出来的磁通一定等于进入 S 极的磁通，而当气隙均匀时，每极磁通与磁动势曲线和横坐标所包围的面积成正比。在图 4-14 所示情况下，由于  $y_c$  小于  $(2\pi - y_c)$ ，故线圈内一段圆周的磁动势大于线圈外一段的磁动势。

从图 4-15(a) 可见，在线圈内通以电流后，磁动势沿气隙圆周按矩形规律分布，但因线圈宽度不同，随之表征磁动势大小的两个矩形波的高度也不同，一个高度为  $\left(1 - \frac{y_c}{2\pi}\right) i_c N_c$ ，另一个高度为  $\frac{y_c}{2\pi} i_c N_c$ 。当电流  $i_c$  随时间按正弦规律变化时，两个矩形波高度也随时间按正弦规律变化。

把上述按矩形规律分布的脉振磁动势用傅里叶级数进行分析可得如图 4-15(b) 所示的一系列谐波。当取  $x$  (机械弧度) 为横坐标，并把坐标原点选在线圈的中心线上时，则得单个线圈的磁动势

$$\begin{aligned} F_c(x) &= F_{c1} \cos x + F_{c2} \cos 2x + F_{c3} \cos 3x + \cdots F_{c\nu'} \cos \nu' x + \cdots \\ &= \sum_{\nu'=1}^{\infty} F_{c\nu'} \cos \nu' x \end{aligned}$$

式中： $F_{c1}, F_{c2}, F_{c3}, \cdots, F_{c\nu'}$  分别为极对数为  $1, 2, 3, \cdots, \nu'$  的谐波磁动势幅值，其值可按傅里叶级数用积分法求出如下：

$$\begin{aligned} F_{c\nu'} &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{y_c}{2}} \left(1 - \frac{y_c}{2\pi}\right) i_c N_c \cos \nu' x \, dx - \frac{2}{\pi} \int_{\frac{y_c}{2}}^{\pi} \frac{y_c}{2\pi} i_c N_c \cos \nu' x \, dx \\ &= i_c N_c \left[ \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{y_c}{2\pi}\right) \frac{1}{\nu'} \sin\left(\nu' \frac{y_c}{2}\right) + \frac{2y_c}{2\pi^2 \nu'} \sin\left(\nu' \frac{y_c}{2}\right) \right] \\ &= \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\nu'} i_c N_c \sin\left(\nu' \frac{y_c}{2}\right) \text{ (安 / 极)} \end{aligned}$$

设电机极对数为  $p$ ，则  $p$  是基波极对数。如果令  $\nu = \nu' / p$  表示谐波对基波的次数，则第  $\nu$  次谐波磁动势 (其极对数为  $\nu p$ ) 的幅值 (以  $\nu' = \nu p$  代入上式) 为

$$F_{c\nu} = \frac{2}{\pi} \frac{i_c N_c}{\nu p} \sin\left(\nu \frac{p y_c}{2}\right) = \frac{2}{\pi} \frac{i_c N_c}{\nu p} k_p$$

式中:  $k_p = \sin\left(\nu \frac{p y_1}{2}\right) = \sin\left(\nu \frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right)$  为  $\nu$  次谐波的短距因数;  $y_1$  和  $\tau$  分别为线圈的节距和基波极距, 用相同单位表示。

当  $i_c = \sqrt{2} I_c \sin \omega t$  ( $I_c$  为导体电流的有效值,  $\omega = 2\pi f$  为电流的角频率) 时, 则

$$F_{c\nu} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_c N_c}{\nu p} k_p \sin \omega t$$

这时  $\nu$  次谐波磁动势的幅值  $F_{c\nu}$  随时间按正弦规律脉振, 而  $\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_c N_c}{\nu p} k_p$  是其振幅(即最大的幅值)。

从单个线圈的磁动势表达式可见, 电流流过单个线圈产生的矩形波磁动势包括极对数  $\nu'$  为  $1, 2, 3, 4, \dots$  的一系列谐波, 即所有极对数为整数的谐波都可能产生。因此, 计算谐波次数  $\nu$  时, 应从  $\frac{1}{p}$  次,  $\frac{2}{p}$  次,  $\frac{3}{p}$  次,  $\dots$  算起, 一直到  $\frac{\infty}{p}$  次。谐波的幅值与电流和谐波的短距系数成正比, 与谐波的次数成反比。同时, 从图 4-15(b) 可以看出, 所有谐波磁动势的波幅都在线圈的中心线上。利用这一点, 可以确定各谐波的空间位置。但究竟是正波幅还是负波幅在线圈的中心线上, 取决于  $F_{c\nu}$  的正负, 也即决定于短距因数  $k_p$  的正负。

**4-23** 试分析对称三相绕组中通过幅值相等、相位相同的交流电流  $i_A = i_B = i_C = I_m \cos \omega t$  时(这种电流称为零序电流), 所产生的基波和 3 次谐波合成磁动势。

**解** 以 A 相绕组的轴线处为空间坐标的原点, 并以顺着  $A \rightarrow B \rightarrow C$  相绕组的方向作为空间角度  $\alpha$  (以电角度计) 的正方向。

(1) 基波合成磁动势  $f_1$ 。

① 各相的基波磁动势。

$$f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$f_{B1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\alpha - 120^\circ)$$

$$f_{C1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\alpha - 240^\circ)$$

② 基波合成磁动势  $f_1$ 。

$$\begin{aligned}
 f_1 &= f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} \\
 &= F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha + F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\alpha - 120^\circ) + F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\alpha - 240^\circ) \\
 &= F_{\phi 1} \cos \omega t [\cos \alpha + \cos(\alpha - 120^\circ) + \cos(\alpha - 240^\circ)] \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

即基波合成磁动势为零。

(2) 3 次谐波合成磁动势  $f_3$ 。

① 各相 3 次谐波磁动势。

$$\begin{aligned}
 f_{A3} &= F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha \\
 f_{B3} &= F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3(\alpha - 120^\circ) = F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha \\
 f_{C3} &= F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3(\alpha - 240^\circ) = F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha
 \end{aligned}$$

② 3 次谐波合成磁动势

$$\begin{aligned}
 f_3 &= f_{A3} + f_{B3} + f_{C3} \\
 &= F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha + F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha + F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha \\
 &= 3F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha
 \end{aligned}$$

即 3 次谐波合成磁动势为脉振磁动势, 其幅值为  $3F_{\phi 3}$ 。

**4-24** 试用解析法证明: 三相绕组通以对称负序电流时, 将形成反向推移的基波旋转磁动势。

**证** 以 A 相绕组的轴线处为空间坐标的原点, 并以顺着  $A \rightarrow B \rightarrow C$  相绕组的方向作为空间角度  $\alpha$  (以电角度计) 的正方向。若三相绕组通以对称负序电流, 即

$$\begin{aligned}
 i_A &= \sqrt{2} I_\phi \cos \omega t \\
 i_B &= \sqrt{2} I_\phi \cos(\omega t + 120^\circ) = \sqrt{2} I_\phi \cos(\omega t - 240^\circ) \\
 i_C &= \sqrt{2} I_\phi \cos(\omega t + 240^\circ) = \sqrt{2} I_\phi \cos(\omega t - 120^\circ)
 \end{aligned}$$

则各相的基波磁动势分别为

$$\begin{aligned}
 f_{A1} &= F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha \\
 &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha) \\
 f_{B1} &= F_{\phi 1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ) \\
 &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha - 120^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha)
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 f_{C1} &= F_{\phi 1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ) \\
 &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha + 120^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha) \\
 &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha - 240^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha)
 \end{aligned}$$

三相基波合成磁动势

$$\begin{aligned}
 f_1 &= f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} \\
 &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha) \\
 &\quad + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha - 120^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha) \\
 &\quad + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha - 240^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha) \\
 &= \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} [\cos(\omega t - \alpha) + \cos(\omega t - \alpha - 120^\circ) \\
 &\quad + \cos(\omega t - \alpha - 240^\circ)] \\
 &= \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha)
 \end{aligned}$$

已知  $f_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha)$  时形成正向推移的基波旋转磁动势(见教材或习题4-21),同理可证明,  $f_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha)$  时形成反向推移的基波旋转磁动势。证毕。

**4-25** 两相绕组 A 和 B,其匝数和绕组因数均相同, A 相在空间超前于 B 相  $90^\circ + \alpha$  电角度,若  $i_A = I_m \cos \omega t$ ,问要使 A 相和 B 相的基波合成磁动势成为正向推移(从 A 和 B)恒幅的旋转磁动势时,  $i_B$  的表达式应是怎样的?

**解** 以 A 相绕组的轴线处为空间坐标的原点,并以顺着 A  $\rightarrow$  B 相绕组的方向作为空间角度  $\theta_s$ (以电角度计)的正方向。

根据题意,要使两相基波合成磁动势成为正向推移(从 A 到 B),则 A 相电流应超前 B 相电流,故设 B 相电流滞后 A 相电流  $\beta$  电角度,即  $i_B = I_m \cos(\omega t - \beta)$ 。

(1) 各相基波磁动势。

$$f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \theta_s$$

$$f_{B1} = F_{\phi 1} \cos(\omega t - \beta) \cos(\theta_s - 90^\circ - \alpha)$$

(2) 各相基波脉振磁动势的分解。

$$f_{A1} = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s)$$

$$= f_{A1+} + f_{A1-}$$

$$f_{B1} = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s - \beta + 90^\circ + \alpha)$$

$$+ \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s - \beta - 90^\circ - \alpha)$$

$$= f_{B1+} + f_{B1-}$$

根据题意,要使两相基波合成磁动势成为正向推移(从 A 到 B) 恒幅的旋转磁动势,应使 A 相的基波负序磁动势  $f_{A1-}$  与 B 相的基波负序磁动势  $f_{B1-}$  相互抵消,即  $f_{A1-}$  与  $f_{B1-}$  应大小相等、角速度相同,旋转方向相同,相位相差  $180^\circ$  电角度,故应设

$$\beta + 90^\circ + \alpha = 180^\circ$$

即

$$\beta = 180^\circ - 90^\circ - \alpha = 90^\circ - \alpha$$

将  $\beta = 90^\circ - \alpha$  代入 B 相基波磁动势表达式,得

$$f_{B1} = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s - 90^\circ + \alpha + 90^\circ + \alpha)$$

$$+ \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s - 90^\circ + \alpha - 90^\circ - \alpha)$$

$$= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s + 2\alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s - 180^\circ)$$

$$= f_{B1+} + f_{B1-}$$

(3) 两相基波合成磁动势

$$f_1 = f_{A1} + f_{B1}$$

$$= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s)$$

$$+ \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s + 2\alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s - 180^\circ)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \cos(\omega t - \theta_s) + \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \cos(\omega t - \theta_s + 2\alpha) \\
 &= f_{A1+} + f_{B1+}
 \end{aligned}$$

由于  $f_{A1+}$  与  $f_{B1+}$  幅值相等、角速度相同、旋转方向相同,仅相位相差  $2\alpha$  电角度(即  $F_{A1+}$  与  $F_{B1+}$  在空间相对静止),所以两相基波合成磁动势  $f_1$  为正向推移(从 A 到 B)恒幅( $F_1 = F_{A1+} + F_{B1+}$ )的旋转磁动势。

由以上分析可知,要使 A 相和 B 相的基波合成磁动势成为正向推移(从 A 到 B)恒幅的旋转磁动势时,  $i_B$  的表达式应为

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 90^\circ + \alpha)$$

### 4.3 经典题型

1. 什么是相带?在三相交流电机中为什么常用  $60^\circ$  相带?如何用  $60^\circ$  相带法分相?

答 在三相交流电机中,为了使三相绕组对称,通常令每个磁极下每相绕组所占的范围相等,这个范围称为相带,即相带通常是指一个线圈组在基波磁场中所跨的电角度。由于一个磁极相当于  $180^\circ$  电角度,分配到三相,则每相的相带为  $60^\circ$  相带。按  $60^\circ$  相带排列的绕组称为  $60^\circ$  相带绕组。还有一种划分相带的方法,将每一对磁极分为三等份,则每相占  $120^\circ$  电角度,也可以得到对称的三相绕组。按  $120^\circ$  相带排列的绕组称为  $120^\circ$  相带绕组。

$60^\circ$  相带绕组和  $120^\circ$  相带绕组的分布系数计算公式如下:

$$k_{d1(60^\circ)} = \frac{\sin 30^\circ}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}}$$

$$k_{d1(120^\circ)} = \frac{\sin 60^\circ}{2q \sin \frac{\alpha_1}{2}}$$

$$\frac{k_{d1(60^\circ)}}{k_{d1(120^\circ)}} = 1.1547$$

可见,以相同的线圈接成  $60^\circ$  相带与  $120^\circ$  相带时,  $60^\circ$  相带绕组的分布系数是  $120^\circ$  相带的 1.1547 倍,即  $60^\circ$  相带绕组的合成电动势是  $120^\circ$  相带

的 1.1547 倍。因此,在三相交流电机中一般都采用  $60^\circ$  相带绕组。而  $120^\circ$  相带绕组通常只用在单绕组变极电机中。

采用  $60^\circ$  相带法分相,就是把每个磁极的  $180^\circ$  空间电角度分为三等份,每相在每极下占有  $\frac{1}{3}$  空间地带,即  $60^\circ$  空间电角度,把它所对应的槽内的导体分配到三个相里去,从而构成三相对称绕组。

2. 如何理解整距线匝基波电动势有效值正好是每根导体基波电动势的两倍?整距线匝基波电动势有效值的大小与线匝本身和转子的相对位置有无关系?

答 整距线匝是由两根在空间位置上相距一个极距的导体构成的。当一根导体处在 N 极的中心位置时,另一根导体一定处在 S 极的中心位置,它们在空间的相位差是  $180^\circ$  电角度,所以它们的基波感应电动势在时间上的相位差就是  $180^\circ$  电角度,在规定正方向下,线匝的基波电动势等于两导体基波电动势之差,所以线匝基波电动势有效值必定等于导体基波电动势有效值的两倍。

整距线匝基波电动势有效值是整距线匝基波电动势最大值的  $1/\sqrt{2}$ ,而整距线匝基波电动势最大值是指线匝的两根导体分别处在 N 极中心和 S 极中心时,线匝所感应的基波电动势,这个值与线匝和转子的瞬时相对位置是无关的,所以整距线匝基波电动势有效值也与线匝和转子的相对位置无关。但是,线匝基波电动势的瞬时值与线匝和转子的相对位置是有关的。

3. 一台频率为 50 Hz 的三相交流电机,今通入频率为 60 Hz 的三相对称电流,如电流的有效值不变,相序不变,试问此时三相合成基波磁动势的幅值、转速和转向是否会改变?

答 根据三相绕组基波合成磁动势的幅值  $F_1 = 1.35 \frac{Nk_{w1}}{p} I_1$  可知,  $F_1$  与电流的频率  $f_1$  无关,由于绕组联结没有改变,故绕组系数  $k_{w1}$  和磁动势的极对数  $p$  均未变,今电流的有效值不变,故磁动势的幅值不变。

根据基波合成磁动势的转速  $n_1 = \frac{60f_1}{p} = n_s$  可知,  $n_1$  与电流的频率  $f_1$

成正比,由于频率  $f_1$  由 50 Hz 变为 60 Hz,故转速  $n_1$  上升为原来的 1.2 倍。

由于三相电流的通电相序不变,所以旋转磁动势的转向不变。

4. 产生脉振磁动势、圆形旋转磁动势、椭圆形旋转磁动势的条件各有哪些?在任一瞬间上述三种磁场的空间分布是怎样的?当仅观察一瞬间,能否区别该磁场是哪一种磁场?当连续观察几个瞬间时,又该如何区分?

答 产生脉振磁动势的条件是绕组中通过单相交流电流。

产生圆形旋转磁动势的条件有两个:一是绕组要多相对称(如两相绕组的轴线在空间相差  $90^\circ$  电角度,三相绕组的轴线在空间互差  $120^\circ$  电角度等);二是通过的电流是多相对称电流(如两相电流的相位相差  $90^\circ$  电角度,三相电流的相位互差  $120^\circ$  电角度等),电流的相数与绕组的相数相同。

产生椭圆形旋转磁场的条件也有两个:一是绕组为多相绕组,各相绕组之间有一定的相位差,但不是对称绕组;二是通过的电流是多相电流,各相电流之间有一定的相位差,但不是对称电流。需要指出的是,即使上述两个条件中,有一个满足对称的条件,也不能产生圆形旋转磁动势。

在任一瞬间,上述三种磁场在空间均呈正弦分布,无法区别它们的不同,但是只要连续观察就不难发现三种磁场有以下区别:脉振磁场的零点的位置在空间不变,磁场的波幅在变化;圆形旋转磁场的波幅不变且匀速旋转;椭圆形旋转磁场的波幅既旋转又变化,即波幅在最大和最小之间变化,转速也不均匀,波幅达最大值时,转速最慢;波幅达最小值时,转速最快。

5. 一台六相交流电机,定子绕组为六相对称绕组,它们在定子上沿逆时针方向依次排列为:A相、B相、C相、D相、E相、F相。每相绕组的有效匝数为  $Nk_{w1}$  ( $k_{w1}$  为定子绕组基波绕组系数),极对数为  $p$ 。今在六相绕组中通入频率为  $f_1$  的电流,各相分别为:  $i_A = \sqrt{2}I_1 \cos \omega t$ ,  $i_B = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t - 60^\circ)$ ,  $i_C = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t - 120^\circ)$ ,  $i_D = i_E = i_F = 0$ 。试用解析法分析定子绕组的基波合成磁动势的性质(圆形、椭圆形、脉振)及磁动势的幅值、转向、转速。

**解** 六相对称绕组的空间相位差为  $60^\circ$  电角度, 把空间坐标  $\theta_s$  (电角度) 的原点取在 A 相绕组的轴线上, 则各相绕组产生的脉振磁动势基波表达式为

$$f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \theta_s \cos \omega t = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s)$$

$$\begin{aligned} f_{B1} &= F_{\phi 1} \cos(\theta_s - 60^\circ) \cos(\omega t - 60^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s - 120^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{C1} &= F_{\phi 1} \cos(\theta_s - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta_s - 240^\circ) \end{aligned}$$

$$f_{D1} = f_{E1} = f_{F1} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{因为 } f_1 &= f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} + f_{D1} + f_{E1} + f_{F1} \\ &= \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta_s) \end{aligned}$$

所以定子绕组的基波合成磁动势为圆形旋转磁动势。

基波合成磁动势朝  $\theta_s$  的正方向旋转 (即从 A 相绕组轴线  $\rightarrow$  B 相绕组轴线  $\rightarrow$  C 相绕组轴线  $\rightarrow \dots$ )。

$$\text{基波合成磁动势的转速 } n = \frac{60 f_1}{p} \text{ (r/min)}$$

$$\text{基波合成磁动势的幅值 } F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} = \frac{3}{2} \times 0.9 \frac{N k_{w1}}{p} I_\phi = 1.35 \frac{N k_{w1}}{p} I_\phi$$

式中:  $I_\phi$  为相电流。

6. 一台三相交流电机, 采用三相双层短距绕组 ( $60^\circ$  相带), 每极每相槽数  $q = 5$ , 已知其 5 次谐波的绕组系数  $k_{w5} = 0.10$ , 试求该绕组的基波及 7 次谐波的绕组系数。

$$\begin{aligned} \text{解} \quad q\alpha &= \frac{\pi}{m} = \frac{180^\circ}{3} = 60^\circ \\ \alpha &= \frac{60^\circ}{q} = \frac{60^\circ}{5} = 12^\circ \end{aligned}$$

(1) 5 次谐波分布因数  $k_{d5}$  和节距因数  $k_{p5}$ 。

$$k_{d5} = \frac{\sin\left(\nu \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\nu \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(5 \times \frac{5 \times 12^\circ}{2}\right)}{5 \times \sin\left(5 \times \frac{12^\circ}{2}\right)} = 0.20$$

$$k_{p5} = \frac{k_{w5}}{k_{d5}} = \frac{0.10}{0.20} = 0.50$$

(2) 极距  $\tau$  和节距  $y_1$ 。

$$k_{p5} = \sin\left(\nu \frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(5 \times \frac{y_1}{\tau} \times \frac{\pi}{2}\right) = 0.50$$

$$\frac{5\pi}{2} \times \frac{y_1}{\tau} = 2k\pi + \frac{\pi}{6}$$

取  $k = 1$ , 则  $\frac{y_1}{\tau} = \frac{13}{15}$ 。因为  $q = 5$ , 所以  $\tau = 15$ , 同理  $y_1 = 13$ 。

(3) 基波绕组因数  $k_{w1}$ 。

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{5 \times 12^\circ}{2}}{5 \times \sin \frac{12^\circ}{2}} = 0.957$$

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{13}{15} \times \frac{\pi}{2}\right) = 0.978$$

$$k_{w1} = k_{d1} \times k_{p1} = 0.957 \times 0.978 = 0.936$$

(4) 7次谐波的绕组因数  $k_{w7}$ 。

$$k_{d7} = \frac{\sin\left(\nu \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\nu \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(7 \times \frac{5 \times 12^\circ}{2}\right)}{5 \times \sin\left(7 \times \frac{12^\circ}{2}\right)} = -0.1494$$

$$k_{p7} = \sin\left(\nu \frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(7 \times \frac{13}{15} \times \frac{\pi}{2}\right) = -0.1045$$

$$k_{w7} = k_{d7} \times k_{p7} = (-0.1494) \times (-0.1045) = 0.0156$$

7. 一台三相异步电动机, 极数  $2p = 4$ , 定子槽数  $Q_1 = 24$ , 采用单层同心式绕组, 大线圈的节距为7(第1槽至第8槽), 小线圈的节距为5(第2槽至第7槽)。试计算此种绕组的绕组因数。

解 定子的极距  $\tau = \frac{Q_1}{2p} = \frac{24}{4} = 6$

$$\text{每极每相槽数 } q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

如果为整距线圈,则节距  $y_1 = \tau = 6$ ,第1槽至第7槽、第2槽至第8槽分别组成两个线圈。由此可见,虽然单层同心式绕组中大线圈的节距为7,小线圈的节距为5,但它们串联得到的电动势和与其对应的两个整距线圈串联得到的电动势大小相等、相位相同,故

$$\text{节距因数} \quad k_{p1} = 1.0$$

$$\text{因为 } \alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ, \text{ 故}$$

$$\text{分布因数} \quad k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{2 \times 30^\circ}{2}}{2 \times \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0.966$$

$$\text{绕组因数} \quad k_{w1} = k_{d1} k_{p1} = 0.966 \times 1.0 = 0.966$$

8. 有一台两极交流发电机,定子槽数  $Q_1 = 24$ ,采用三相双层叠绕组,节距  $y_1 = \frac{5}{6}\tau$ ,每个线圈的匝数  $N_c = 1$ 。试将此绕组分别联结成对称二相与对称六相双层叠绕组,取三相绕组的功率为1,分别求连成这两种绕组与连成三相绕组时的功率比。

解 (1) 三相双层绕组时。

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{1 \times 360^\circ}{24} = 15^\circ$$

$$q_{(3)} = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{24}{2 \times 3} = 4$$

$$\text{分布因数 } k_{d1(3)} = \frac{\sin \frac{q_{(3)}\alpha}{2}}{q_{(3)} \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \times 15^\circ}{2}}{4 \times \sin \frac{15^\circ}{2}} = 0.9577$$

设并联支路数  $a = 1$ , 则

$$\text{每相串联匝数 } N_{(3)} = \frac{2pqN_c}{a} = \frac{2 \times 4 \times 1}{1} = 8$$

(2) 二相双层绕组时。

极对数  $p$  未变,  $\alpha$  不变, 则



$$q_{(二)} = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{24}{2 \times 2} = 6$$

$$k_{d1(二)} = \frac{\sin \frac{q_{(二)}\alpha}{2}}{q_{(二)} \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{6 \times 15^\circ}{2}}{6 \times \sin \frac{15^\circ}{2}} = 0.9029$$

$$N_{(二)} = \frac{2pq_{(二)}N_c}{a} = \frac{2 \times 6 \times 1}{1} = 12$$

(3) 六相双层绕组时。

极对数  $p$  未变,  $\alpha$  不变, 则

$$q_{(六)} = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{24}{2 \times 6} = 2$$

$$k_{d1(六)} = \frac{\sin \frac{q_{(六)}\alpha}{2}}{q_{(六)} \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{2 \times 15^\circ}{2}}{2 \times \sin \frac{15^\circ}{2}} = 0.9914$$

$$N_{(六)} = \frac{2pq_{(六)}N_c}{a} = \frac{2 \times 2 \times 1}{1} = 4$$

(4) 功率比。

采用不同的相数时, 线圈节距未变, 所以节距因数相同, 即

$$k_{p1(二)} = k_{p1(三)} = k_{p1(六)}$$

采用不同的相数时, 导线截面积未变, 所以相电流相同, 即

$$I_{\star(二)} = I_{\star(三)} = I_{\star(六)}$$

采用不同的相数时, 每极磁通未变, 即

$$\Phi_{m(二)} = \Phi_{m(三)} = \Phi_{m(六)}$$

由于相电动势  $E_{\star} = 4.44fN\Phi_m k_{w1}$ , 电机的功率  $P = mE_{\star}I_{\star}$ , 故

$$\begin{aligned} P_{(二)} : P_{(三)} : P_{(六)} &= (2 \times N_{(二)} \times k_{d1(二)}) : (3 \times N_{(三)} \times k_{d1(三)}) : \\ &\quad (6 \times N_{(六)} \times k_{d1(六)}) \\ &= (2 \times 12 \times 0.9029) : (3 \times 8 \times 0.9577) : \\ &\quad (6 \times 4 \times 0.9914) \\ &= 21.670 : 22.985 : 23.794 \end{aligned}$$

## 4.4 补充习题及解答

### 4.4.1 补充习题

1. 空间电角度是怎样定义的?空间电角度与时间电角度两者的含义有什么不同?在数值上两者有什么关系?

2. 采用短距、分布和三相联结的办法来削弱高次谐波电动势,可以改善线电动势的波形,试问此时每根导体中电动势的波形怎样?是否也能得到改善?

3. 试比较单相交流绕组与三相交流绕组所产生的磁动势有何区别?与直流绕组磁动势又有何区别?

4. 试比较单层绕组与双层绕组的优缺点及它们的应用范围。

5. 试述三相绕组高次谐波磁动势的极对数、极距、转向、转速和幅值,它们建立的磁场在三相绕组内感应电动势的频率是多少?

6. 如何采用短距绕组消除  $\nu$  次谐波电动势?若欲同时削弱 5 次和 7 次谐波,应如何选择线圈的节距?

7. 在某一台三相同步电机中,假如由三相对称基波电流产生的  $\nu$  次谐波磁场的磁密幅值与由转子直流励磁产生的  $\nu$  次谐波磁场的磁密幅值相等。试问这两个谐波磁场在定子绕组中感应电动势的幅值之比是多少?

8. 试证明一个圆形旋转磁场可以用两个在时间上和在空间上相差  $90^\circ$  电角度的等幅脉振磁场来表示。

9. 有一个三相单层绕组,  $Q_1 = 36, 2p = 6$ , 并联支路数  $a = 1$ 。试分别画出:

(1) 单层链式绕组的展开图;

(2) 单层同心式绕组的展开图。

10. 有一个三相单层绕组,  $Q_1 = 54, 2p = 6, a = 1$ , 试画出单层交叉式绕组展开图。

11. 已知一台三相交流电机,极数  $2p = 4$ , 定子绕组是双层叠绕组,  $Q_1 = 36, y_1 = \frac{7}{9}\tau$ , 定子绕组为  $\triangle$  联结, 每个线圈匝数  $N_c = 2$ , 气隙基

波每极磁通  $\Phi_1 = 1.264 \text{ Wb}$ , 绕组并联支路数  $a = 1$ , 试求:

- (1) 基波绕组系数;
- (2) 基波相电动势和线电动势。

12. 一台三相同步发电机,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $n_N = 1500 \text{ r/min}$ , 定子采用双层叠绕组,  $q = 3$ ,  $\frac{y_1}{\tau} = \frac{8}{9}$ , 每相串联匝数  $N = 110$ , Y 联结, 每极磁通  $\Phi_1 = 1.014 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ,  $\Phi_3 = 0.651 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ,  $\Phi_5 = 0.226 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ,  $\Phi_7 = 0.088 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ 。试求:

- (1) 电机的极对数;
- (2) 定子槽数;
- (3) 绕组系数  $k_{w1}$ 、 $k_{w3}$ 、 $k_{w5}$ 、 $k_{w7}$ ;
- (4) 相电动势  $E_{1\phi}$ 、 $E_{3\phi}$ 、 $E_{5\phi}$ 、 $E_{7\phi}$  及合成相电动势  $E_\phi$  和合成线电动势  $E_L$ 。

13. 一台三相交流电机,  $2p = 2$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $Q_1 = 60$ , 定子绕组为双层叠绕组, 每相串联匝数  $N = 198$ , 气隙基波每极磁通  $\Phi_1 = 0.152 \text{ Wb}$ 。试求:

- (1) 绕组为整距时, 基波绕组系数和 5 次谐波绕组系数;
- (2) 整距绕组的基波相电动势;
- (3) 要消除 5 次谐波电动势, 绕组节距应如何选择? 此时基波相电动势为多少?

14. 一台汽轮发电机,  $2p = 2$ ,  $P_N = 6000 \text{ kW}$ ,  $U_N = 6.3 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , Y 联结,  $\cos\varphi_N = 0.8$ ,  $Q_1 = 36$ , 双层短距绕组,  $y_1 = 15$ , 每个线圈匝数  $N_c = 2$ , 并联支路数  $a = 2$ 。试求额定电流时:

- (1) 一个线圈所产生的磁动势的基波幅值;
- (2) 一相绕组所产生基波磁动势的幅值;
- (3) 三相合成磁动势基波的幅值、转速和转向。

15. 一台两极电机中有一个 120 匝的整距线圈。试求:

- (1) 若通入 6 A 的直流电流, 其所产生的磁动势的形状如何? 这时基波和 3 次谐波磁动势的幅值各为多少?

- (2) 若通入正弦电流  $i = \sqrt{2} \times 6 \sin\omega t \text{ (A)}$ , 其所产生的磁动势的形

状如何?这时基波和 3 次谐波磁动势的幅值各为多少?

16. 一台三相交流电机,  $Q_1 = 24$ ,  $2p = 4$ , 采用三相单层绕组, 每相串联匝数  $N = 50$ , 相电流  $I_A = 12$  A, 试求:

- (1) 三相合成基波磁动势幅值及三相合成 5 次谐波磁动势幅值;
- (2) 5 次谐波磁动势幅值与基波磁动势幅值之比。

#### 4.4.2 补充习题解答

1. 答 计量电磁关系的角度单位称为电气角度, 简称电角度。从电磁方面看, 对于一个按一定周期变化的物理量(如磁动势、电动势、电压、电流等), 完成一个交变周期, 其相位即变化了  $360^\circ (2\pi \text{ rad})$  电角度。衡量空间量(如磁动势、磁通密度等)的电角度称为空间电角度, 用  $\theta_s$  (或  $\alpha$ ) 表示; 衡量时间量(如电动势、电压、电流等)的电角度称为时间电角度, 用  $\omega t$  表示。

电机圆周在几何上占有角度为  $360^\circ$ , 称为机械角度。而从电磁方面看, 一对磁极占有空间电角度为  $360^\circ$ 。而对于 4 极(磁极对数  $p = 2$ )电机, 其空间电角度为机械角度的两倍。一般而言, 对于  $p$  对极电机, 其空间电角度为机械角度的  $p$  倍, 即

$$\text{空间电角度} = p \times \text{机械角度}$$

空间电角度是对空间量或空间位置而言, 时间电角度仅对时间量而言。但两者在数值上相当, 即在空间上所位移的电角度, 等于所经历的时间电角度。

2. 答 因为每根导体中感应电动势的波形取决于电机气隙中磁通密度的波形, 所以采用短距、分布和三相联结等办法是不能改变导体中感应电动势波形的。这些办法只能改善线圈电动势、绕组相电动势、绕组线电动势的波形。如采用短距绕组和分布绕组可以削弱高次谐波电动势, 改善线圈电动势以及绕组电动势的波形; 采用 Y 联结和  $\Delta$  联结可以消除绕组线电动势中的 3 次及 3 的倍数次谐波电动势, 改善绕组线电动势的波形。

3. 答 单相交流绕组通入单相交流电流时, 产生的磁动势为脉振磁动势, 它的空间位置固定, 波幅随时间而变化, 其波幅的大小与

正负与电流的大小、正负有关,其脉振的频率与电流的频率相同;对称的三相交流绕组通入对称的三相电流时,产生的磁动势为圆形旋转磁动势,它的幅值不变,在空间随时间旋转,其基波合成磁动势的幅值是单相绕组所产生的基波磁动势的幅值的  $3/2$  倍,其转速与电流的频率成正比,而与电机的极对数成反比;直流绕组通入直流电流时,产生的磁动势不仅在空间位置固定不变,而且大小也不随时间而变化,是恒定磁动势。

**4. 答** 单层绕组的线圈数目是定子槽数的一半,因此绕线和嵌线工时少,每个槽内只有一个线圈边,不需层间绝缘,槽利用率高;双层绕组的线圈数目与定子槽数相等,比单层绕组的线圈数目多一倍,每个槽内有两个线圈边,需要层间绝缘,槽利用率低,且有可能造成层间绝缘击穿。

单层绕组一般都是整距绕组,不易采用短距来削弱谐波,电机的电磁噪声和铁损耗较大;双层绕组可以灵活选择线圈的节距,可以改善电机的电磁性能。

单层绕组一般用于  $10\text{ kW}$  以下的小型感应电动机中;双层绕组多用于大、中型交流电机中。

**5. 答**  $\nu$  次谐波磁动势的极对数  $p_\nu$  为基波磁动势极对数  $p$  的  $\nu$  倍,即  $p_\nu = \nu p$ ;  $\nu$  次谐波磁动势的极距  $\tau_\nu$  为基波磁动势极距  $\tau$  的  $\frac{1}{\nu}$ , 即  $\tau_\nu = \frac{1}{\nu}\tau$ ;  $\nu$  次谐波磁动势的转向由  $\nu = 6k \pm 1 (k = 1, 2, 3, \dots, n)$  决定,当  $\nu = 6k + 1$  时,其转向与基波磁动势的转向相同,当  $\nu = 6k - 1$  时,其转向与基波磁动势的转向相反;  $\nu$  次谐波磁动势的转速  $n_\nu$  为基波磁动势转速  $n_s$  的  $\frac{1}{\nu}$ , 即  $n_\nu = \frac{1}{\nu}n_s$ ;  $\nu$  次谐波磁动势的幅值  $F_\nu = \frac{3}{2} \times \frac{1}{\nu} \times 0.9 \times \frac{Nk_{w\nu}}{p} I_\phi$ 。

$\nu$  次谐波磁场在三相绕组内感应电动势的频率为  $f_\nu = \frac{p_\nu n_\nu}{60} =$

$$\frac{\nu p \times \frac{1}{\nu} n_s}{60} = \frac{pn_s}{60} = f_1, \text{ 即与基波频率相同。}$$

6. 答 要想消除  $\nu$  次谐波电动势, 应使线圈的两个有效边在  $\nu$  次谐波磁场中处于相同的位置, 即使线圈的节距  $y_1 = k(2\tau_\nu)$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ )。为不使基波电动势被削弱过多, 应取  $2k = \nu - 1$ , 即  $y_1 = k(2\tau_\nu) = (\nu - 1)\tau_\nu = \frac{\nu - 1}{\nu}\tau$ 。如欲消除 5 次谐波电动势, 则应取  $y_1 = \frac{5 - 1}{5}\tau = \frac{4}{5}\tau$ ; 如欲消除 7 次谐波电动势, 则应取  $y_1 = \frac{7 - 1}{7}\tau = \frac{6}{7}\tau$ ; 如欲同时削弱 5 次和 7 次谐波电动势, 则应使  $\frac{4}{5}\tau < y_1 < \frac{6}{7}\tau$ , 通常选择  $y_1 = \frac{5}{6}\tau$ 。

7. 答 设定子基波磁场的极对数、极距、转速及在定子绕组中感应电动势的频率分别为  $p, \tau, n_s, f_1$ ; 定子  $\nu$  次谐波磁场的极对数、极距、转速及在定子绕组中感应电动势  $E_{\nu}$  的频率分别为  $p_\nu, \tau_\nu, n_\nu, f_\nu$ ; 转子  $\nu$  次谐波磁场的极对数、极距、转速及在定子绕组中感应电动势  $E'_{\nu}$  的频率分别为  $p'_\nu, \tau'_\nu, n'_\nu, f'_\nu$ , 并考虑到对于同步电机, 转子  $\nu$  次谐波磁场随转子一起旋转, 而转子转速  $n$  总是等于同步转速  $n_s$ , 则

$$p_\nu = p'_\nu = \nu p$$

$$\tau_\nu = \tau'_\nu = \frac{1}{\nu}\tau$$

$$n_\nu = \frac{1}{\nu}n_s$$

$$n'_\nu = n = n_s$$

$$f_\nu = \frac{p_\nu n_\nu}{60} = \frac{\nu p \times \frac{1}{\nu} n_s}{60} = \frac{pn_s}{60} = f_1$$

$$f'_\nu = \frac{p'_\nu n'_\nu}{60} = \frac{\nu p n_s}{60} = \nu f_1$$

由于已知定子  $\nu$  次谐波磁场磁密幅值  $B_{m\nu}$  与转子  $\nu$  次谐波磁场的磁密幅值  $B'_{m\nu}$  相等, 故两者的每极磁通相等, 设为  $\Phi_{m\nu}$ 。又由于两者的极数和极距是相等的, 故定子绕组  $\nu$  次谐波绕组系数亦是相等的, 设为  $k_{u\nu}$ 。因此, 定子  $\nu$  次谐波磁场在定子绕组中感应电动势幅值与转子  $\nu$  次谐波磁场在定子绕组中感应电动势幅值之比为

$$\frac{\sqrt{2}E_{\nu}}{\sqrt{2}E'_{\nu}} = \frac{E_{\nu}}{E'_{\nu}} = \frac{4.44f_{\nu}Nk_{w\nu}\Phi_{m\nu}}{4.44f'_{\nu}Nk_{w\nu}\Phi_{m\nu}} = \frac{f_{\nu}}{f'_{\nu}} = \frac{f_1}{\nu f_1} = \frac{1}{\nu}$$

8. 证 设三相绕组基波合成磁动势的表达式为

$$f_1 = F_1 \cos(\omega t - \theta_s)$$

利用三角函数公式, 上式可写成

$$\begin{aligned} f_1 &= F_1 \cos \omega t \cos \theta_s + F_1 \sin \omega t \sin \theta_s \\ &= F_1 \cos \omega t \cos \theta_s + F_1 \cos(\omega t - 90^\circ) \cos(\theta_s - 90^\circ) \end{aligned}$$

显然上式第一项和第二项均为脉振磁动势, 且在空间上和时间上均相差  $90^\circ$  电角度。证毕。

9. 解 (1) 每极每相槽数  $q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{36}{6 \times 3} = 2$ 。

(2) 槽距电角  $\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{3 \times 360^\circ}{36} = 30^\circ$ 。

(3) 极距  $\tau = \frac{Q_1}{2p} = \frac{36}{6} = 6$ 。

(4) 线圈节距  $y_1$ 。

① 单层链式绕组取  $y_1 = 5$ 。

② 单层同心式绕组每个线圈组由一个大线圈和一个小线圈组成, 其节距分别为  $y'_1 = 7$  和  $y''_1 = 5$ 。

(5) 绕组展开图(单层链式绕组如图 4-16 所示, 单层同心式绕组如图 4-17 所示)。

10. 解 (1) 每极每相槽数  $q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{54}{6 \times 3} = 3$ 。

(2) 槽距电角  $\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{3 \times 360^\circ}{54} = 20^\circ$ 。

(3) 极距  $\tau = \frac{Q_1}{2p} = \frac{54}{6} = 9$ 。

(4) 线圈节距  $y_1$ 。

每个线圈组由两个大线圈和一个小线圈组成。大线圈节距  $y'_1 = 8$ , 小线圈节距  $y''_1 = 7$ 。

(5) 绕组展开图(见图 4-18)。

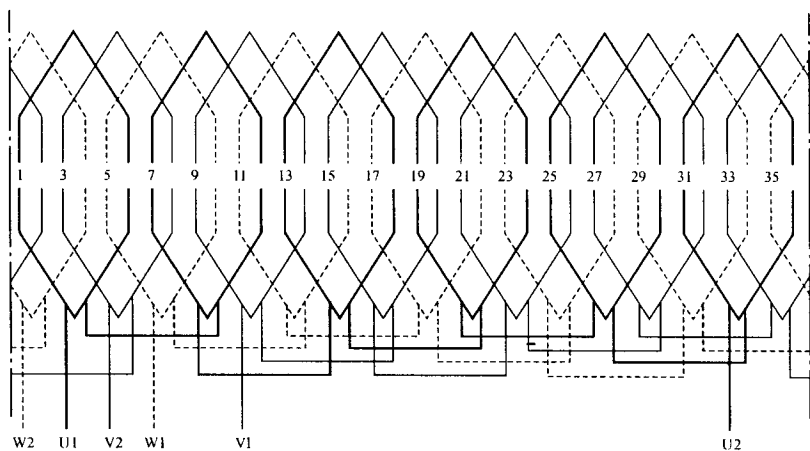


图 4-16 三相单层链式绕组展开图

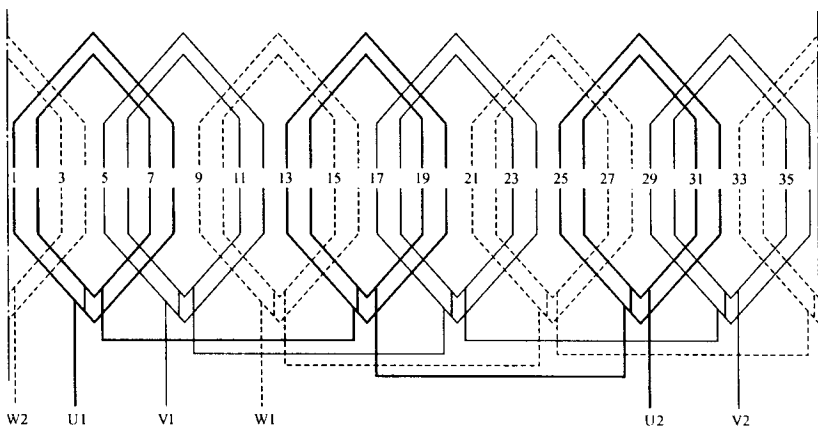
 $(2p = 6, Q_1 = 36, a = 1, y_1 = 5)$ 


图 4-17 三相单层同心式绕组展开图

 $(2p = 6, Q_1 = 36, a = 1, y'_1 = 7, y''_1 = 5)$ 

11. 解 (1) 基波绕组系数  $k_{w1}$ 。

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$



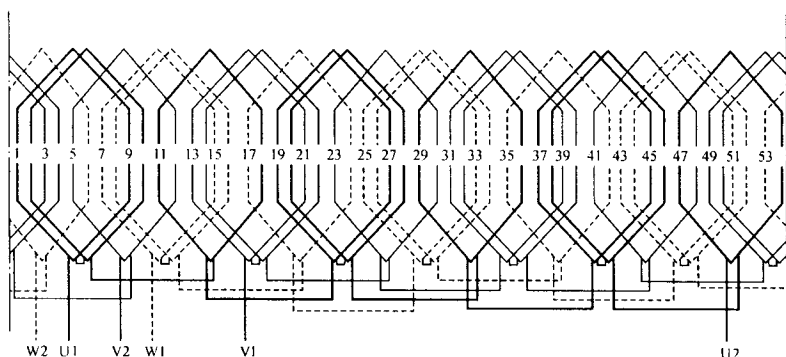


图 4-18 三相单层交叉式绕组展开图

$$(2p = 6, Q_1 = 54, a = 1, y'_1 = 8, y''_1 = 7)$$

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

$$\tau = \frac{Q_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

$$y_1 = \frac{7}{9}\tau = \frac{7}{9} \times 9 = 7$$

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 20^\circ}{2}}{3 \times \sin \frac{20^\circ}{2}} = 0.96$$

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{7}{9} \times 90^\circ\right) = 0.94$$

$$k_{w1} = k_{p1} k_{d1} = 0.94 \times 0.96 = 0.902$$

(2) 基波相电动势  $E_{1\phi}$  和线电动势  $E_{1L}$ 。

由于是双层绕组

$$N = \frac{2pqN_c}{a} = \frac{4 \times 3 \times 2}{1} = 24$$

$$E_{1\phi} = 4.44 f N k_{w1} \Phi_1 = 4.44 \times 50 \times 24 \times 0.902 \times 1.264 \text{ V} = 6074.6 \text{ V}$$

由于是  $\Delta$  联结

$$E_{1L} = E_{1\phi} = 6074.6 \text{ V}$$

## 12. 解 (1) 电机的极对数。

因为同步电机  $n_N = n_s$

$$\text{所以} \quad p = \frac{60f}{n_s} = \frac{60f}{n_N} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2$$

## (2) 定子槽数

$$Q_1 = 2pmq = 4 \times 3 \times 3 = 36$$

## (3) 绕组系数。

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

## ① 节距因数。

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{8}{9} \times 90^\circ\right) = 0.9848$$

$$k_{p3} = \sin\left(3 \frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right) = \sin\left(3 \times \frac{8}{9} \times 90^\circ\right) = -0.8660$$

$$k_{p5} = \sin\left(5 \frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right) = \sin\left(5 \times \frac{8}{9} \times 90^\circ\right) = 0.6428$$

$$k_{p7} = \sin\left(7 \frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right) = \sin\left(7 \times \frac{8}{9} \times 90^\circ\right) = -0.3420$$

## ② 分布因数。

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 20^\circ}{2}}{3 \times \sin \frac{20^\circ}{2}} = 0.9598$$

$$k_{d3} = \frac{\sin\left(3 \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(3 \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(3 \times \frac{3 \times 20^\circ}{2}\right)}{3 \times \sin\left(3 \times \frac{20^\circ}{2}\right)} = 0.6667$$

$$k_{d5} = \frac{\sin\left(5 \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(5 \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(5 \times \frac{3 \times 20^\circ}{2}\right)}{3 \times \sin\left(5 \times \frac{20^\circ}{2}\right)} = 0.2176$$

$$k_{d7} = \frac{\sin\left(7 \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(7 \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(7 \times \frac{3 \times 20^\circ}{2}\right)}{3 \times \sin\left(7 \times \frac{20^\circ}{2}\right)} = -0.1774$$

③ 绕组系数。

$$k_{w1} = k_{p1} k_{d1} = 0.9848 \times 0.9598 = 0.9452$$

$$k_{w3} = k_{p3} k_{d3} = -0.866 \times 0.6667 = -0.5774$$

$$k_{w5} = k_{p5} k_{d5} = 0.6428 \times 0.2176 = 0.1399$$

$$k_{w7} = k_{p7} k_{d7} = -0.342 \times (-0.1774) = 0.0607$$

(4) 电动势。

$$E_{1\phi} = 4.44 f N k_{w1} \Phi_1$$

$$= 4.44 \times 50 \times 110 \times 0.9452 \times 1.014 \times 10^{-2} \text{ V}$$

$$= 234.05 \text{ V}$$

$$E_{3\phi} = 4.44 f_3 N k_{w3} \Phi_3$$

$$= 4.44 \times 3 \times 50 \times 110 \times (-0.5774) \times 0.651 \times 10^{-2} \text{ V}$$

$$= -275.38 \text{ V}$$

$$E_{5\phi} = 4.44 f_5 N k_{w5} \Phi_5$$

$$= 4.44 \times 5 \times 50 \times 110 \times 0.1399 \times 0.226 \times 10^{-2} \text{ V}$$

$$= 38.60 \text{ V}$$

$$E_{7\phi} = 4.44 f_7 N k_{w7} \Phi_7$$

$$= 4.44 \times 7 \times 50 \times 110 \times 0.0607 \times 0.088 \times 10^{-2} \text{ V}$$

$$= 9.13 \text{ V}$$

$$E_{\phi} = \sqrt{E_{1\phi}^2 + E_{3\phi}^2 + E_{5\phi}^2 + E_{7\phi}^2}$$

$$= \sqrt{234.05^2 + (-275.38)^2 + 38.6^2 + 9.13^2} \text{ V}$$

$$= 363.58 \text{ V}$$

$$E_L = \sqrt{3} \times \sqrt{E_{1\phi}^2 + E_{3\phi}^2 + E_{5\phi}^2 + E_{7\phi}^2}$$

$$= \sqrt{3} \times \sqrt{234.05^2 + 38.6^2 + 9.13^2} \text{ V}$$

$$= 411.15 \text{ V}$$

13. 解 (1) 整距绕组时的  $k_{w1}$  和  $k_{w5}$ 。

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{60}{2 \times 3} = 10$$

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{1 \times 360^\circ}{60} = 6^\circ$$

$$\tau = \frac{Q_1}{2p} = \frac{60}{2} = 30$$

由于是整距

$$y_1 = \tau = 30$$

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau}90^\circ\right) = \sin\left(\frac{30}{30} \times 90^\circ\right) = 1$$

$$k_{p5} = \sin\left(5 \frac{y_1}{\tau}90^\circ\right) = \sin\left(5 \times \frac{30}{30} \times 90^\circ\right) = 1$$

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{10 \times 6^\circ}{2}}{10 \sin \frac{6^\circ}{2}} = 0.9554$$

$$k_{d5} = \frac{\sin\left(5 \frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(5 \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(5 \times \frac{10 \times 6^\circ}{2}\right)}{10 \sin\left(5 \times \frac{6^\circ}{2}\right)} = 0.1932$$

$$k_{w1} = k_{p1} k_{d1} = 1 \times 0.9554 = 0.9554$$

$$k_{w5} = k_{p5} k_{d5} = 1 \times 0.1932 = 0.1932$$

(2) 整距绕组的基波相电动势

$$\begin{aligned} E_{1\phi} &= 4.44 f N k_{w1} \Phi_1 \\ &= 4.44 \times 50 \times 198 \times 0.9554 \times 0.152 \text{ V} \\ &= 6383.3 \text{ V} \end{aligned}$$

(3) 要消除 5 次谐波电动势, 应有

$$y_1 = \frac{\nu-1}{\nu} \tau = \frac{5-1}{5} \times 30 = 24$$

$$k_{p1} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = \sin \frac{24}{30} \times 90^\circ = 0.9511$$

$$k_{w1} = k_{p1} k_{d1} = 0.9511 \times 0.9554 = 0.9087$$

$$\begin{aligned} E_{1\phi} &= 4.44 f N k_{w1} \Phi_1 \\ &= 4.44 \times 50 \times 198 \times 0.9087 \times 0.152 \text{ V} \\ &= 6071.3 \text{ V} \end{aligned}$$

14. 解 (1) 一个线圈所产生的基波磁动势的幅值  $F_{cl}$ 。

$$I_{N\phi} = I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N} = \frac{6000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3 \times 0.8} \text{ A} = 687.34 \text{ A}$$

$$I_c = \frac{I_{N\Phi}}{a} = \frac{687.34}{2} \text{ A} = 343.67 \text{ A}$$

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{36}{2 \times 3} = 6$$

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{1 \times 360^\circ}{36} = 10^\circ$$

$$\tau = \frac{Q_1}{2p} = \frac{36}{2} = 18$$

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{15}{18} \times 90^\circ\right) = 0.9659$$

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{6 \times 10^\circ}{2}}{6 \sin \frac{10^\circ}{2}} = 0.9561$$

$$k_{w1} = k_{p1} k_{d1} = 0.9659 \times 0.9561 = 0.9235$$

$$F_{c1} = 0.9 N_c k_{p1} I_c = 0.9 \times 2 \times 0.9659 \times 343.67 \text{ A} = 597.51 \text{ A}$$

(2) 一相绕组所产生的基波磁动势的幅值  $F_{\Phi 1}$ 。

$$N = \frac{2pqN_c}{a} = \frac{2 \times 6 \times 2}{2} = 12$$

$$\begin{aligned} F_{\Phi 1} &= 0.9 \frac{Nk_{w1}}{p} I_{N\Phi} \\ &= 0.9 \times \frac{12 \times 0.9235}{1} \times 687.34 \text{ A} \\ &= 6855.4 \text{ A} \end{aligned}$$

(3) 三相合成磁动势基波的幅值、转速和转向。

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\Phi 1} = \frac{3}{2} \times 6855.4 \text{ A} = 10283.1 \text{ A}$$

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{1} \text{ r/min} = 3000 \text{ r/min} = n_s$$

三相合成基波磁动势的转向为顺转子旋转方向旋转。

**15. 解** (1) 通入 6 A 直流电流时的磁动势为一个两极分布的恒定的空间矩形波, 其幅值

$$F_c = \frac{1}{2} N_c I = \frac{1}{2} \times 120 \times 6 \text{ A} = 360 \text{ A}$$

基波磁动势幅值

$$F_{c1} = \frac{4}{\pi} F_c = \frac{4}{\pi} \times 360 \text{ A} = 458.6 \text{ A}$$

3 次谐波磁动势幅值

$$F_{c3} = \frac{1}{3} F_{c1} = \frac{1}{3} \times 458.6 \text{ A} = 152.9 \text{ A}$$

(2) 通入正弦电流  $i = \sqrt{2} \times 6 \sin \omega t$  (A) 时, 磁动势为一个随时间脉动, 在空间上仍为两极分布的矩形波, 其基波分量的幅值

$$F_{c1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I = \frac{4}{\pi} \times \frac{\sqrt{2}}{2} \times 120 \times 6 \text{ A} = 648.46 \text{ A}$$

3 次谐波分量的幅值

$$F_{c3} = \frac{1}{3} F_{c1} = \frac{1}{3} \times 648.46 \text{ A} = 216.15 \text{ A}$$

**16. 解** (1) 合成基波磁动势幅值和合成 5 次谐波磁动势幅值。

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ$$

因为采用单层绕组

$$k_{p1} = k_{p5} = 1.0$$

$$k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{2 \times 30^\circ}{2}}{2 \times \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0.9659$$

$$k_{d5} = \frac{\sin \left( 5 \frac{q\alpha}{2} \right)}{q \sin \left( 5 \frac{\alpha}{2} \right)} = \frac{\sin \left( 5 \times \frac{2 \times 30^\circ}{2} \right)}{2 \sin \left( 5 \times \frac{30^\circ}{2} \right)} = 0.2588$$

$$k_{w1} = k_{p1} k_{d1} = 1.0 \times 0.9659 = 0.9659$$

$$k_{w5} = k_{p5} k_{d5} = 1.0 \times 0.2588 = 0.2588$$

$$F_1 = 1.35 \frac{N k_{w1}}{p} I_\star = 1.35 \times \frac{50 \times 0.9659}{2} \times 12 \text{ A} = 391.19 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} F_5 &= \frac{1}{5} \times 1.35 \frac{Nk_{w5}}{p} I_{\phi} \\ &= \frac{1}{5} \times 1.35 \times \frac{50 \times 0.2588}{2} \times 12 \text{ A} = 20.96 \text{ A} \end{aligned}$$

(2) 5次谐波磁动势幅值与基波磁动势幅值之比

$$\frac{F_5}{F_1} = \frac{20.96}{391.19} = 0.054$$

## 第5章 感应电机

### 5.1 重点和难点

#### 5.1.1 重点

##### 1. 基本概念

感应电机主要由静止的定子和转动的转子两大部分组成,在定、转子之间有一个很小的气隙。

定子是由定子铁心、定子绕组、机座及端盖等组成,机座仅是起固定和支撑之用,不是磁路的一部分;转子则由转子铁心、转子绕组、转轴等组成。根据转子绕组类型的不同,分笼型和绕线型两种。笼型转子绕组是用裸铜条插入转子铁心槽里,或者用铝液直接浇铸(或压铸等)在转子铁心槽里,连同端环、风扇一次铸成;绕线型转子绕组则是以嵌线方式构成与定子绕组同样相数的绕组,绕组引线分别与集电环(又称滑环)相接,然后通过电刷装置与外电路接通。

感应电机按能量转换方式可分为感应发电机和感应电动机两大类。由于感应发电机性能较差,故较少采用。

##### 2. 额定数据

在三相感应电动机的铭牌上,标有额定数据,主要有额定功率  $P_N$ 、额定电压  $U_{1N}$ 、额定电流  $I_{1N}$ 、额定转速  $n_N$ 、额定功率因数  $\cos\varphi_N$  和额定效率  $\eta_N$  等。但必须要弄清楚以下 3 个问题。

(1) 额定功率  $P_N$  是指电动机在额定负载运行时转轴上输出的机械功率,即  $P_N = T_N \Omega_N$  ( $T_N$  为电动机转轴上输出的额定转矩,  $\Omega_N$  为转子的额定角速度,  $\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60}$ ) 或  $P_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N}\cos\varphi_N\eta_N$ 。而电动机的输入功率  $P_1$  是指电网向电动机输入的电功率,即  $P_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N}\cos\varphi_N = \frac{P_N}{\eta_N}$ 。



(2) 额定电压  $U_{1N}$  是指加入定子绕组的线电压;额定电流  $I_{1N}$  是指在输出额定功率时,定子绕组的线电流。

(3) 对绕线转子感应电动机,还要标明转子额定电压  $U_{2N}$ (或转子额定电动势  $E_{2N}$ ) 和转子额定电流  $I_{2N}$ 。 $U_{2N}$ (或  $E_{2N}$ ) 是指定子绕组加额定电压、转子绕组开路时,滑环间的电压(即线电压);转子电流  $I_{2N}$  是指额定运行时,转子绕组的线电流。在没有特殊说明时,转子绕组均为 Y 联结。

### 3. 三相感应电动机的工作原理

在定子的三相对称绕组中通以三相对称交流电流时,在空间便产生旋转磁动势及相应的旋转磁场,这种旋转磁场以同步速度  $n_s = \frac{60f}{p}$  切割转子导体,则在转子绕组中感应电动势。由于转子绕组是短接或通过电阻闭合的,故形成转子电流,而转子电流又与旋转磁场相互作用,便产生电磁转矩使转子跟着旋转磁场旋转。

由此可见,对称绕组和对称交流电流是产生旋转磁场的必备条件,只有磁场在旋转,才能与转子绕组有相对运动,才能在转子绕组中感应电动势及电流,才能有电磁转矩使电机旋转。当转子旋转速度  $n$  与旋转磁场的同步转速  $n_s$  大小相等、方向相同时,那么转子导体与旋转磁场就相对静止,转子绕组就无法感应电动势,也就没有电流和电磁转矩,转子也就无法旋转。所以,感应电动机的转速  $n$  总是低于同步转速  $n_s$ 。只有  $n_s$  与  $n$  之间有一转差( $n_s - n$ ),才能维持感应电动机旋转,即两种转速之间总是存在差异,异步电动机因此而得名。由于转子电流是由电磁感应产生的,故异步电动机又称感应电动机。

### 4. 转差率

转差率  $s$  是感应电机的重要运行参数,按定义转差率  $s = \frac{n_s - n}{n_s}$ 。通常,用转差率表示感应电机的运行状态,根据转差率  $s$  的正负和大小,可以判断感应电机运行于哪一种状态。当  $0 < s < 1$  时,感应电机运行于电动机状态,电磁转矩为驱动性质;当  $-\infty < s < 0$  时,感应电机运行于发电机状态,电磁转矩为制动性质;当  $1 < s < +\infty$  时,感应电机运行于电

磁制动状态,电磁转矩仍起制动作用。

归纳各种运行状态下电磁转矩的作用,可以认为感应电机的电磁转矩总是力图减小转差率的。

### 5. 感应电机分析与变压器分析的区别

感应电机的电磁关系(如定子、转子侧的感应电动势、电流及磁动势平衡关系等)与变压器的电磁关系相似,因而对感应电机的分析通常采用与变压器分析相同的方法,即按电磁过程的物理状况,建立电动势、磁动势平衡方程式,经过归算获得等效电路,并可画出相量图。但是,由于两者结构的不同,也存在明显的差异,主要差异如下。

(1) 主磁场的形式不同。变压器中的主磁场是各相建立的脉振磁场,一、二次侧磁动势均静止不动,轴线处于同一空间轴处;感应电机气隙中的主磁场是由三相电流共同建立的旋转磁场,定、转子侧磁动势同步旋转,轴线也不一定在同一空间轴处。

(2) 感应电机的主磁路中必然存在气隙段,而变压器的主磁路中不设气隙段。因此,感应电机的励磁电流比变压器的励磁电流大得多。

(3) 感应电机的绕组多为由短矩线圈构成的分布绕组,变压器的绕组则可认为是整距集中绕组。

(4) 变压器的一、二次侧绕组都是静止的,因而其感应电动势的频率相同;感应电机的定子绕组是静止的,但转子绕组是旋转的,因而转子绕组感应电动势及其电流的频率与定子侧不同。

(5) 变压器的一、二次侧都是三相对称绕组,只是匝数不同;感应电机的定子绕组是三相对称绕组,转子绕组则是三相对称绕组(绕线型转子)或多相对称绕组(笼型转子),但转子绕组的极数总是与定子绕组的极数相同。

### 6. 转子绕组中的感应电动势和电流

(1) 转子静止时,转子的转速  $n = 0$ ,感应电机的转差率  $s = \frac{n_s - n}{n_s}$   
 $= \frac{n_s - 0}{n_s} = 1$ 。转子导体与气隙主磁场相对运动的速度  $\Delta n = n_s - n = n_s - 0 = n_s$ ,因而转子绕组感应电动势的频率(简称转子频率)  $f_2$  为

$$f_2 = \frac{p\Delta n}{60} = \frac{pm_s}{60} = f_1$$

当  $f_2 = f_1$  时, 转子绕组感应电动势的有效值用  $E_2$  表示, 转子绕组漏电抗用  $X_{2\sigma}$  表示, 转子电流的有效值用  $I_2$  表示, 即

$$E_2 = 4.44 f_2 N_2 k_{w2} \Phi_m = 4.44 f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m$$

$$X_{2\sigma} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi f_1 L_{2\sigma}$$

$$I_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + jX_{2\sigma}} \quad \text{或} \quad I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma}^2}}$$

(2) 转子旋转时, 转子的转速  $n \neq 0$ , 感应电机的转差率  $s = \frac{n_s - n}{n_s} \neq 1$ 。转子导体与气隙主磁场相对运动的速动  $\Delta n = n_s - n = sn_s$ , 因而转子绕组感应电动势的频率

$$f_2 = \frac{p\Delta n}{60} = \frac{psn_s}{60} = s \frac{pn_s}{60} = sf_1$$

由于转子旋转时,  $n \neq 0$ , 所以转差率  $s \neq 1$ , 因此  $f_2 \neq f_1$ 。当  $f_2 \neq f_1$  时, 转子绕组感应电动势的有效值用  $E_{2s}$  表示, 转子绕组漏电抗用  $X_{2\sigma s}$  表示, 转子电流的有效值用  $I_{2s}$  表示, 即

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 k_{w2} \Phi_m = 4.44 sf_1 N_2 k_{w2} \Phi_m = sE_2$$

$$X_{2\sigma s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi sf_1 L_{2\sigma} = sX_{2\sigma}$$

$$I_{2s} = \frac{\dot{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2\sigma s}} \quad \text{或} \quad I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma s}^2}}$$

## 7. 归算

感应电机的定子绕组和转子绕组之间只有磁的联系, 没有电的直接联系。为了得到等效电路, 要进行频率归算和绕组归算。

(1) 频率归算。频率归算就是用定子频率  $f_1$  代替转子频率  $f_2$ , 即将  $f_2$  变为  $f_1$ 。

① 归算原则: 转子磁动势的幅值  $F_2$  不变。

② 分析: 若保证转子磁动势的幅值  $F_2$  不变, 则需要保证转子电流的有效值  $I_2$  不变, 还需保证转子阻抗角  $\varphi_2$  不变, 而与转子电流  $I_2$  的频率  $f_2$  大小无关, 因此

$$I_{2s} = \frac{\dot{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2\sigma s}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_{2\sigma}} = \frac{\dot{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma}} = \dot{I}_2$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{X_{2\sigma s}}{R_2} = \arctan \frac{sX_{2\sigma}}{R_2} = \arctan \frac{X_{2\sigma}}{\frac{R_2}{s}} = \varphi_2$$

③ 结论:若将  $f_2$  变为  $f_1$ , 则需将  $X_{2\sigma s}$  变为  $X_{2\sigma}$ 、将  $R_2$  变为  $\frac{R_2}{s}$ , 或将  $R_2$  变为  $(R_2 + \frac{1-s}{s}R_2)$ 。与此同时, 将  $E_{2s}$  变为  $E_2$ 、将  $I_{2s}$  变为  $I_2$ 。

(2) 绕组归算。绕组归算就是用一个相数为  $m_1$ 、匝数为  $N_1$ 、绕组因数为  $k_{w1}$  的绕组代替实际的相数为  $m_2$ 、匝数为  $N_2$ 、绕组因数为  $k_{w2}$  的转子绕组。其归算原则和归算方法与变压器绕组归算相似, 即

$$\text{转子电流} \quad I'_2 = \frac{1}{k_i} I_2$$

$$\text{转子电动势} \quad E'_2 = k_e E_2$$

$$\text{转子电阻} \quad R'_2 = k_e k_i R_2$$

$$\text{转子漏电抗} \quad X'_{2\sigma} = k_e k_i X_{2\sigma}$$

式中:  $k_i$  为电流比,  $k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}}$ ;  $k_e$  为电压比,  $k_e = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}}$ 。

## 8. 基本方程式

感应电动机进行归算后, 可列出 5 个基本方程式:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_{1\sigma}) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_{1\sigma}$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m (R_m + jX_m) = -\dot{I}_m Z_m$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) = \dot{I}'_2 \left( R'_2 + jX'_{2\sigma} + \frac{1-s}{s} R'_2 \right)$$

$$= \dot{I}'_2 \left( Z'_{2\sigma} + \frac{1-s}{s} R'_2 \right)$$

$$= \dot{I}'_2 Z'_{2\sigma s}$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m$$

式中:  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{I}_1$  为定子绕组的相电压、相电动势、相电流;  $R_1$ 、 $X_{1\sigma}$ 、 $Z_{1\sigma}$  为

定子绕组每相的电阻、漏电抗、漏阻抗;  $E'_2$ 、 $I'_2$  为归算到定子侧的转子绕组的相电动势、相电流;  $R'_2$ 、 $X'_{2\sigma}$ 、 $Z'_{2\sigma}$  为归算到定子侧的转子绕组每相的电阻、漏电抗、漏阻抗;  $Z'_{2os}$  为转子的等效阻抗,  $Z_{2os} = Z'_{2\sigma} + \frac{1-s}{s}R'_2 = \frac{R'_2}{s} + jX_{2\sigma}$ 。

### 9. 感应电动机的功率平衡方程式

(1) 感应电动机中的功率和损耗。

① 输入功率  $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1$

② 电磁功率  $P_e = m_2 E_2 I_2 \cos\psi_2 = m_1 E'_2 I'_2 \cos\psi'_2 = m_1 I'^2_2 \frac{R'_2}{s}$

③ 总机械功率  $P_\Omega = m_1 I'^2_2 \frac{1-s}{s} R'_2$

④ 输出功率  $P_2 = T_2 \Omega$

⑤ 定子铜耗  $p_{Cu1} = m_1 I^2_1 R_1$

⑥ 转子铜耗  $p_{Cu2} = m_2 I^2_2 R_2 = m_1 I'^2_2 R'_2$

⑦ 铁耗  $p_{Fe} = m_1 I^2_m R_m$

⑧ 机械损耗  $p_\Omega = m_1 I'^2_2 \frac{1-s}{s} R'_2$

⑨ 杂散损耗  $p_\Delta = (1\% \sim 3\%) P_N$  (中小型感应电动机)

$p_\Delta = 0.5\% P_N$  (大型感应电动机)

式中:  $m_1$  为定子绕组的相数;  $m_2$  为转子绕组的相数。

(2) 两个重要的关系式。

①  $p_{Cu2} = sP_e$

②  $P_\Omega = (1-s)P_e$

(3) 功率平衡方程式。

①  $P_e = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe}$

②  $P_\Omega = P_e - p_{Cu2}$

③  $P_2 = P_\Omega - p_\Omega - p_\Delta$

$= P_e - p_{Cu2} - p_\Omega - p_\Delta$

$= P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} - p_{Cu2} - p_\Omega - p_\Delta$

$= P_1 - \sum p$

## 10. 感应电动机的电磁转矩与转矩平衡方程式

(1) 电磁转矩  $T_e$  的表达式。

① 物理表达式。

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{m_1 E'_2 I'_2 \cos \psi_2}{\Omega_s} = \frac{m_1 \sqrt{2} \pi f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m \frac{m_2 N_2 k_{w2}}{m_1 N_1 k_{w1}} I_2 \cos \psi_2}{\frac{2\pi f_1}{p}}$$

$$= \frac{pm_2 N_2 k_{w2}}{\sqrt{2}} \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = C'_T \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

式中:  $C'_T$  为转矩系数,  $C'_T = \frac{pm_2 N_2 k_{w2}}{\sqrt{2}}$ 。

② 参数表达式。

$$T_e = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + c \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$

式中:  $c$  为修正系数,  $c = |\dot{c}| \approx 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m}$ 。

③ 实用表达式。

$$\frac{T_e}{T_{\max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

式中:  $T_{\max}$  为最大转矩;  $s_m$  为临界转差率。

## 11. 感应电机的转矩-转差率曲线

感应电机的输出主要体现在转矩和转速上, 因此转速(或转差率)是感应电机的基本变量之一。当电源的电压  $U_1$  和频率  $f_1$  为常数, 并且电机的参数(电阻和漏电抗)可以认为不变时, 则电磁转矩  $T_e$  仅与转差率  $s$  有关。电磁转矩  $T_e$  与转差率  $s$  之间的关系曲线  $T_e = f(s)$ , 就称为转矩-转差率特性曲线(又称机械特性), 或  $T_e-s$  曲线。

转矩-转差率特性的表达式与电磁转矩的参数表达式相同, 它表明了电磁转矩  $T_e$  与电压  $U_1$ 、频率  $f_1$ 、参数、转差率  $s$  的关系。当电源电压  $U_1$  和频率  $f_1$  恒定, 电机的参数已知时, 把不同的转差率  $s$  代入该表达

式,便可算出对应的电磁转矩  $T_e$ ,从而可得到转矩-转差率特性曲线  $T_e = f(s)$ 。把转矩-转差率特性曲线  $T_e = f(s)$  的纵、横坐标对调,并利用  $n = n_s(1-s)$  把转差率  $s$  转换为对应的转速  $n$ ,就可以得到感应电机的机械特性  $n = f(T_e)$ 。

### 12. 最大转矩和过载能力

从感应电机的转矩-转差率曲线可知,异步电动机和发电机运行时各有一个最大电磁转矩  $T_{\max}$ 。把  $T_e$  对  $s$  求一阶导数,并令  $\frac{dT_e}{ds} = 0$ ,即可求出产生最大转矩时的转差率,即临界转差率

$$s_m = \pm \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}} \approx \pm \frac{R'_2}{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}$$

将  $s_m$  代入电磁转矩的参数表达式,可得最大转矩

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \pm \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2}{2c [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}]} \\ &\approx \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_s (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})} \end{aligned}$$

式中:正号对应于电动机状态,负号对应于发电机状态。

电动机的最大转矩  $T_{\max}$  与额定转矩  $T_N$  之比称为过载能力(又称最大转矩倍数),用  $k_T$  表示,即

$$k_T = \frac{T_{\max}}{T_N}$$

过载能力是感应电动机的重要性能指标之一。当电动机运行时,如果总制动转矩大于最大转矩,电动机就会停转。为保证电动机不因短时过载而停转,要求电动机具有一定的过载能力。

### 13. 启动转矩和启动电流

感应电动机接通电源开始启动( $s = 1$ )时的电磁转矩称为启动转矩,用  $T_{st}$  表示。将  $s = 1$  代入电磁转矩的参数表达式,可得

$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$

若要求启动时的电磁转矩达到最大转矩值(即  $T_{st} = T_{\max}$ ),可令临界转差率  $s_m = 1$ ,此时转子电阻应为

$$R'_2 + R'_{st} = \frac{1}{c} \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} \approx X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$$

式中:  $R'_{st}$  为串入转子绕组每相回路中的附加电阻(也即启动电阻)归算到定子绕组后的数值。

通常用额定转矩的倍数来表示启动转矩,启动转矩  $T_{st}$  与额定转矩  $T_N$  之比称为启动转矩倍数,用  $k_{st}$  表示,即

$$k_{st} = \frac{T_{st}}{T_N}$$

启动转矩倍数也是感应电动机的重要性能指标之一。

根据感应电动机 T 形等效电路,略去励磁电流  $I_m$  不计,近似地认为  $I_1 \approx I'_2$ , 则启动电流

$$I_{st} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}}$$

#### 14. 感应电动机的工作特性

在额定电压和额定频率下,感应电动机的转速  $n$ 、电磁转矩  $T_e$ 、定子电流  $I_1$ 、功率因数  $\cos\varphi_1$ 、效率  $\eta$  随输出功率  $P_2$  而变化的关系曲线,称为感应电动机的工作特性。

(1) 转速特性  $n = f(P_2)$ 。感应电动机的转速特性曲线是一条对横轴稍微下降的曲线,即随着  $P_2$  的增大,  $n$  略微下降,具有较硬的特性。

(2) 转矩特性  $T_e = f(P_2)$ 。由于从空载到额定负载之间感应电动机的转速变化很小,故转矩特性曲线很接近于直线。但考虑到负载增加时,  $n$  稍有降低,故转矩特性曲线呈略微上翘趋势。

(3) 定子电流特性  $I_1 = f(P_2)$ 。空载时转子电流  $I_2 \approx 0$ , 定子电流  $I_1$  几乎全部为励磁电流。当负载增大时,转子转速下降,转子电流增大,为抵偿转子磁动势的增大,定子磁动势和定子电流将随之增大。

(4) 功率因数特性  $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ 。空载运行时,感应电动机定子电流主要为无功磁化电流,功率因数很低,通常在 0.2 以下。负载增加后,定子电流有功分量增加,故功率因数随负载增加而提高,在满载附近接近最大值。额定功率因数  $\cos\varphi_N$  约为 0.7 ~ 0.93。感应电动机从电网上吸取很大的滞后无功电流,因此,它的功率因数  $\cos\varphi_1$  永远小



于1。

(5) 效率特性  $\eta = f(P_2)$ 。感应电动机的效率特性曲线和直流电动机及变压器的效率特性曲线很相似。感应电动机的损耗也可分为不变损耗和可变损耗两部分。不变损耗主要是铁耗和机械损耗；可变损耗主要是定、转子铜耗和一部分杂散损耗。当可变损耗与不变损耗相等时，效率达到最大值。对常用的中小型感应电动机，效率约在  $\frac{3}{4} \sim \frac{4}{4}$  额定负载范围内达到最大值。

### 15. 感应电动机的启动

感应电动机接通电源后，从静止状态到稳定运行状态的过程称为启动过程，简称启动。

感应电动机启动性能的主要技术指标有启动转矩倍数  $T_{st}/T_N$  和启动电流倍数  $I_{st}/I_N$ ，其中启动转矩  $T_{st}$  和启动电流  $I_{st}$  是电动机启动刚开始 ( $s = 1$ ) 时的输出转矩 (近似为电磁转矩) 和定子电流。

常用的启动方法有以下几种。

(1) 直接启动。直接启动就是用闸刀开关或接触器把电动机的定子绕组直接接到额定电压和额定频率的电网上。直接启动的优点是操作和启动设备都最简单，缺点是启动电流很大。在一般情况下，只有直接启动时的启动电流在电网中引起的电压降落不超过  $10\% \sim 15\%$ ，才允许采用直接启动。一般笼型感应电动机直接启动时的启动电流倍数  $I_{st}/I_N$  为  $4 \sim 7$ ，启动转矩倍数  $T_{st}/T_N$  为  $1 \sim 2$ 。

(2) Y- $\Delta$  启动。Y- $\Delta$  启动只适用于正常运行时定子绕组为  $\Delta$  联结的电动机。定子绕组的六个出线端都要引出，在启动时把它接成星形，启动完毕后再接成三角形。

当定子绕组为  $\Delta$  联结时，加在定子相绕组上的电压为额定电压  $U_{1N}$ ；而当定子绕组改为 Y 联结时，加在定子相绕组上的电压只等于额定电压的  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。因此，改为 Y 联结启动时电网供给的启动电流  $I_{st(Y)}$  只有

原来  $\Delta$  联结启动时电网供给的启动电流  $I_{st(\Delta)}$  的  $\frac{1}{3}$ ；由于启动转矩与相

电压的平方成正比,因此,启动转矩也减小到只有原来的 $\frac{1}{3}$ (不考虑参数变化)。Y- $\Delta$ 启动法所用设备比较简单,但只适用于轻载启动或空载启动的场合。

(3) 自耦变压器降压启动。这种方法是利用一台自耦变压器来降低加于电动机定子绕组上的端电压。启动时,自耦变压器的高压侧接电源,低压侧接电动机,以便降低电压,减小启动电流。启动完毕后,将自耦变压器切除,电动机直接与电网相联。

设自耦变压器的电压比为 $k_v$ 。利用自耦变压器降压启动与直接启动相比较,电网所供给的启动电流将减小为原来直接启动时的 $1/k_v^2$ ;启动转矩也减小到直接启动时的 $1/k_v^2$ 。

自耦变压器降压启动的优点是不受电动机绕组接线方式的限制,而且可以按容许的启动电流和所需要的启动转矩来选择自耦变压器的抽头,其缺点是启动设备费用较高。

(4) 绕线型感应电动机转子回路串接启动电阻启动。在绕线型感应电动机的转子回路中串入适当的启动电阻 $R_{st}$ ,既可降低启动电流,又可提高启动转矩。若欲使启动转矩达到电动机的最大转矩,需要串入的启动电阻

$$R_{st} = \frac{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}}{ck_i k_e} - R_2 \approx \frac{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}{k_i k_e} - R_2$$

式中: $k_i$ 和 $k_e$ 分别为电流变比和电压变比。

绕线型感应电动机启动时,将全部启动电阻串入转子回路中。电动机转动后,随着转速升高,电磁转矩将逐渐减小。为了缩短启动时间,可把串入的启动电阻逐段切除,以提高启动过程中的电磁转矩。启动结束后,将启动电阻全部切除。

应用频敏变阻器作为绕线型感应电动机的启动电阻时,能起到随着电动机的转速升高,自动地逐渐切除电阻的作用,使电动机平稳地启动起来。

## 16. 感应电动机的调速

从三相感应电动机转速表达式

$$n = n_s(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s)$$

可知,欲改变感应电动机的转速  $n$ ,可采用变极、变频和改变转差率等方法。

(1) 变极调速。改变定子绕组的极对数  $p$ ,可以改变定子旋转磁场的同步转速  $n_s$ ,从而实现变极调速。

定子绕组极对数的改变,是通过改变绕组的接线方式来实现的。由于笼型转子本身没有固定的极数,它的极数随定子绕组极数的变化而变化,变换极数时比较方便,所以变极调速都采用笼型转子。

变极调速时,应注意变极调速前后电动机的转向是否一致。

(2) 变频调速。改变电动机所接电源的频率  $f_1$ ,可以改变定子旋转磁场的同步转速  $n_s$ ,从而实现变频调速。当电动机的转差率  $s$  变化不大时,电动机的转速  $n$  基本上正比于频率  $f_1$ 。显然,如果感应电动机的供电设备的频率能够平滑可调,则可以平滑地调节感应电动机的转速。

变频调速时,通常希望气隙磁通  $\Phi_m$  基本保持不变。另一方面,也希望变频调速时电动机的过载能力  $k_T$  保持不变。因此,变频调速时,电压  $U_1$  应随频率  $f_1$  的改变而调节。设  $U_1$ 、 $f_1$  分别为变频调速前的电源电压和频率, $U'_1$ 、 $f'_1$  分别为变频调速后的电源电压和频率,则

① 若希望调速时转矩不变,则要求

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1}$$

② 若希望调速时输出功率不变,则要求

$$\frac{U'_1}{U_1} = \sqrt{\frac{f'_1}{f_1}}$$

③ 若希望调速时转矩随转速的平方成正比变化,则要求

$$\frac{U'_1}{U_1} = \left(\frac{f'_1}{f_1}\right)^2$$

(3) 改变转差率调速。改变感应电动机的转差率  $s$  有很多种方法。当负载的总制动转矩( $T_2 + T_0$ )不变时,与它平衡的电磁转矩  $T_e$  也跟着不变。于是,从电磁转矩的参数表达式可见,当频率  $f_1$  和极对数  $p$  不变时,转差率  $s$  是下列各物理量的函数

$$s = f(U_1, R_1, X_{1\sigma}, R'_2, X'_{2\sigma})$$

因此,改变转差率  $s$  调速的方法有以下几种。

① 改变加于定子绕组的端电压  $U_1$ , 即降电压调速。降压调速方法比较简单,但是对于一般的笼型感应电动机,降压调速只有很窄的调速范围。

② 改变定子电阻  $R_1$  或漏电抗  $X_{1\sigma}$  调速,为此须在定子绕组串联外加电阻或电抗器。

③ 改变转子绕组漏电抗  $X_{2\sigma}$ , 为此须采用绕线型感应电动机,在转子回路串入电抗器或电容器。

④ 改变转子绕组电阻  $R_2$ , 为此须采用绕线型感应电动机,在转子回路串入调速电阻  $R_n$ 。

当电机拖动恒转矩负载时,  $T_e = T_2 + T_0 = \text{常数}$ , 从电磁转矩的参数表达式可见,若参数  $R_1$ 、 $X_{1\sigma}$  和  $X'_{2\sigma}$  皆不变,欲保持电磁转矩  $T_e$  不变,则应有  $\frac{R'_2}{s}$  不变。这说明:恒转矩调速时,转差率  $s$  将随转子回路总电阻  $(R'_2 + R'_n)$  成正比例变化,  $(R'_2 + R'_n)$  增加一倍,则转差率  $s$  也增加一倍,这时  $\frac{R'_2 + R'_n}{s} = \text{常数}$ 。因此,在转子回路中串入的调速电阻  $R_n$  愈大,则转差率  $s$  愈大,而电动机的转速就愈低。

由于转子回路串电阻调速比较简单,故在中小容量的绕线型感应电动机调速中应用较广。但是,在转子回路串入调速电阻后,将使转子铜耗增大,导致电动机的效率降低。

⑤ 串级调速。所谓串级调速,就是在绕线型感应电动机转子回路中串入一个三相对称的附加电动势  $\dot{E}_t$ , 其频率与  $\dot{E}_{2s}$  的频率  $f_2$  相同,只要改变  $\dot{E}_t$  的大小和相位,就可以调节电动机的转速。

由于转子频率  $f_2 = sf_1$  是随转子转速而变化的,要使一个频率随转子转速而变化的外加交流电动势  $\dot{E}_t$  串入转子回路是相当困难的。因此,目前都是采用把转子交流电动势整流,再用一个可控直流电动势  $\dot{E}_t$  与它对接,这就避免了随时变频的麻烦,由此而构成串级调速系统。

### 5.1.2 难点

#### 1. 感应电动机定、转子磁动势转速的相互关系

设  $n_1$  为定子磁动势  $F_1$  的转速,即定子旋转磁动势相对于定子的转

速,  $n_1 = \frac{60f_1}{p} = n_s$ ; 设  $n_2$  为转子磁动势  $F_2$  相对于转子的转速,  $n_2 = \frac{60f_2}{p}$ ;  $n$  为转子的转速, 即转子相对于定子的转速;  $n'_2$  为转子磁动势  $F_2$  相对于定子的转速, 显然  $n'_2 = n_2 + n$ 。

当转子静止时,  $n = 0$ ,  $f_2 = f_1$ ,  $n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60f_1}{p} = n_1$ , 因此  $n'_2 = n_2 + n = n_1 + 0 = n_1 = n_s$ , 即定、转子磁动势相对静止。

当转子沿气隙磁场的转向以转速  $n < n_s$  旋转时,  $f_2 = sf_1$ , 故  $n_2 = \frac{60f_2}{p} = s \frac{60f_1}{p} = sn_1 = sn_s = n_s - n$ , 因此  $n'_2 = n_2 + n = (n_s - n) + n = n_s$ , 可见定、转子磁动势仍然是相对静止。同理可证, 当  $n > n_s$  和转子逆气隙磁场转向旋转时, 也是  $n'_2 = n_s$ , 即定、转子磁动势仍然是相对静止。

定、转子磁动势保持相对静止是产生恒定电磁转矩的必要条件。

## 2. 笼型转子的相数和极数

由于笼型转子的所有导条的两端被端环短路, 整个结构是对称的, 因此笼型绕组实质上是一个对称的多相绕组。

设转子总导条数为  $Q_2$  (即转子槽数), 当一个正弦分布的旋转磁场切割转子导条时, 每根导条中的感应电动势与导条切割的磁通密度成正比, 其大小随时间也作正弦变化。由于笼型转子的  $Q_2$  根导条均匀地分布在转子圆周上, 则相邻的两根导条在磁场中便相隔  $\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_2}$  电角度, 相应两根导条中的感应电动势在时间上的相位差也是  $\alpha$  电角度。由于每根导条中的电动势在时间上依次相差  $\alpha$  电角度, 每对磁极下的每一根导条就成为一相, 所以笼型转子绕组的总相数  $m_2$  等于一对磁极下的导条数, 即

$$m_2 = \frac{Q_2}{p}$$

当  $\frac{Q_2}{p} \neq$  整数时, 笼型转子绕组的相数就等于转子槽数 (导条数)  $Q_2$ , 即

$$m_2 = Q_2。$$

由于笼型转子的导条都被两端的端环短路, 因而导条中有感应电

动势时便有电流流过。而各根导条电流的空间分布取决于各根导条中感应电动势的分布,也即取决于气隙主磁场的分布,故笼型转子绕组中的电流所产生的磁动势没有固定的极数,它的极数完全取决于感生转子电流的气隙磁场的极数,即总是和定子绕组的极数相同。

由于每对极下每相仅有一根导条,而一根导条为半匝,所以笼型转子绕组每相串联匝数  $N_2 = \frac{1}{2}$ 。因为每相只有一根导条,也就不存在绕组的分布和短距问题,所以笼型转子绕组的绕组系数  $k_{w2} = 1$ 。

### 3. 感应电动机的参数用空载试验和堵转(短路)试验确定

(1) 空载试验的目的是测定感应电动机的励磁参数  $R_m$ 、 $X_m$  以及铁耗  $p_{Fe}$  和机械损耗  $p_\Omega$ 。

① 铁耗  $p_{Fe}$  与机械损耗  $p_\Omega$  的分离。通过空载试验可测得电动机的端电压  $U_1$ 、空载电流  $I_{10}$  和空载输入功率  $P_{10}$ 。此时输入功率  $P_{10}$  消耗在定子绕组铜耗  $p_{Cu1} = m_1 I_{10\phi}^2 R_1$ 、铁耗  $p_{Fe}$ 、机械损耗  $p_\Omega$ 、空载杂散损耗  $p_{\Delta 0}$  和转子绕组铜耗  $p_{Cu2}$  上。因为这时转子电流很小,所以转子铜耗  $p_{Cu2}$  可以忽略。而空载时,电动机的杂散损耗也比较小,故空载杂散损耗  $p_{\Delta 0}$  也可以忽略不计,得

$$P_{10} = m_1 I_{10\phi}^2 R_1 + p_{Fe} + p_\Omega$$

从  $P_{10}$  中减去定子铜耗后可得

$$P'_{10} = P_{10} - m_1 I_{10\phi}^2 R_1 = p_{Fe} + p_\Omega$$

由于铁耗  $p_{Fe}$  基本上与端电压的平方成正比,但机械损耗  $p_\Omega$  则与端电压的大小无关,而仅仅取决于电动机的转速。当电动机的转速无显著变化时,可以认为  $p_\Omega$  不变。因此,如画出  $P'_{10}$  与端电压  $U_{1\phi}^2$  的关系曲线,将它延长到与纵轴 ( $U_{1\phi}^2 = 0$  处) 相交,则交点的纵坐标便代表机械损耗  $p_\Omega$ ,由此可分离出额定电压时的铁耗  $p_{Fe}$ 。

② 励磁参数的求取。空载时,转差率  $s \approx 0$ ,可以认为转子绕组开路,于是参考等效电路,根据空载试验测得的额定电压时的  $I_{10\phi}$  和  $P_{10}$  可算出:

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{10\phi}}, \quad R_0 = \frac{P_{10}}{m_1 I_{10\phi}^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

已知额定电压时的铁耗  $p_{Fe}$ , 则可求得励磁电阻

$$R_m = \frac{p_{Fe}}{m_1 I_{10}^2}$$

从堵转(短路)试验中测得  $X_{10}$  之后, 即可求得励磁电抗

$$X_m = X_0 - X_{10}$$

(2) 堵转(短路)试验的目的是测定短路参数  $R_K$ 、 $X_K$ , 转子绕组电阻  $R_2$ 、定子绕组漏电抗  $X_1$  和转子绕组漏电抗  $X_{2s}$ 。

根据短路试验测得的定子相电压  $U_{1K}$ 、相电流  $I_{1K}$  和输入总功率  $P_{1K}$ , 可以计算出感应电动机的短路参数:

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}, \quad R_K = \frac{P_{1K}}{m_1 I_{1K}^2}, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

对于中、大型感应电动机, 一般来说,  $Z_m \gg Z_{10}$ , 故可进一步忽略励磁电流, 即可近似地认为等效电路中的励磁支路断开, 这时,

$$R_K \approx R_1 + R'_2, \quad X_K \approx X_{10} + X'_{2s}$$

定子绕组电阻  $R_1$  可以用电桥测取, 并设  $X_{10} = X'_{2s}$ , 于是有

$$R'_2 \approx R_K - R_1, \quad X_{10} \approx X'_{2s} \approx \frac{X_K}{2}$$

#### 4. 参数的选取

感应电动机的定、转子绕组的漏电抗在一般情况下是随电流而变化的。在正常工作范围内, 通常认为定、转子绕组的漏电抗基本为一常值。但当定、转子电流比额定值大很多时(如启动时), 漏磁磁路中的铁磁部分将达到饱和, 从而使总的漏磁磁阻变大, 导致漏电抗变小。

为了满足计算感应电动机不同运行性能的要求, 在进行堵转(短路)试验时, 应力争测得  $I_{1K} = I_{1N}$ 、 $I_{1K} = (2 \sim 3)I_{1N}$  和  $U_{1K} = U_{1N}$  等三种情况下的数据, 然后分别计算出不同饱和程度时的短路参数。计算工作特性时, 采用对应于  $I_{1K} = I_{1N}$  时的短路参数; 计算最大转矩时, 采用对应于  $I_{1K} = (2 \sim 3)I_{1N}$  时的短路参数; 而计算启动特性时, 则采用对应于  $U_{1K} = U_{1N}$  时的短路参数。

#### 5. 深槽型和双笼型感应电动机

从对感应电动机的启动和运行性能分析中可知: 启动时为了增大启动转矩、减小启动电流, 要求转子电阻大一些; 运行时为了减小转子

铜耗以提高电动机的效率,要求转子电阻小一些。在绕线型感应电动机中,这一点不难做到。在普通笼型感应电动机中,转子是闭路的,无法串入电阻。为了解决这个矛盾,从转子槽形入手,设法利用集肤效应,制成了具有能改善启动性能的深槽型和双笼型感应电动机。

在启动时,转子电流频率较高, $f_2 = f_1$ ,集肤效应(又称挤流效应)显著,转子导条中的电流分配取决于漏电抗。由于槽底部的漏电抗大于槽上部的漏电抗,所以导条中的电流主要从槽上部(或上笼)流过,其效果相当于减小了导条的截面积,因此转子电阻  $R_2$  增大,从而满足了启动时的要求。

当启动完毕,电动机正常运行时,由于转子电流频率很低, $f_2 = sf_1$ (一般为  $1 \sim 3$  Hz),集肤效应基本消失,转子导条的电阻又重新变小,接近等于直流电阻。由此可见,正常运行的转子电阻会自动变小,从而满足了减小转子铜耗以提高电动机效率的要求。

深槽型和双笼型感应电动机与同容量的普通笼型感应电动机相比,具有较大的启动转矩和较小的启动电流,但是,由于转子槽形窄而深(或转子有上笼和下笼两套笼型绕组),槽漏磁通增多,所以转子漏电抗比普通笼型感应电动机的要大些,运行时的功率因数和最大转矩都稍有降低。

## 6. 单相感应电动机

单相绕组流过单相交流电流时,将在单相感应电动机的气隙中产生一个脉振磁场。该脉振磁场可以分解为幅值相等、方向相反的两个具有相同转速的旋转磁场。

在转子静止时,这两个旋转磁场分别与静止的转子作用,产生的电磁转矩也是大小相等、方向相反。故单相感应电动机若不采取启动措施,不能自启动。

如果借助外力,沿某一方向推动转子一下。与转子旋转方向相同的旋转磁场因其转差率  $s < 1$ ,数值很小,对应的转子电流也很小,但功率因数较高;与转子旋转方向相反的旋转磁场,因其转差率为  $2 - s$ ,数值较大,对应的转子电流也很大,且功率因数很低。两部分转子电流对励磁磁场有不同程度的削弱作用,使正向旋转磁场强于反向旋转磁



场。因此,正向的电磁转矩必然大于反向的电磁转矩,即合成转矩不等于零,故运转中的单相感应电动机能够产生与旋转方向相同的电磁转矩。在这个转矩的作用下,转子就会顺着初始推动的方向转动起来。

单相感应电动机获得启动力矩的条件是使脉振气隙磁场变为旋转磁场。设置启动绕组的分相(又称裂相)启动或罩极启动都可使气隙磁场旋转。

## 5.2 习题详解

**5-1** 把一台三相感应电机用原动机驱动,使其转速  $n$  高于旋转磁场的转速  $n_s$ ,定子接到三相交流电源,试分析转子导条中感应电动势和电流的方向。这时电磁转矩的方向和性质是怎样的?若把原动机去掉,电机转速有何变化?为什么?

**答** 当把一台三相感应电机的定子绕组接到三相交流电源时,定子三相绕组中便有对称的三相电流通过,它们将联合产生一个定子旋转磁场(详见第4章),在图5-1中用N、S表示,设该旋转磁场以转速  $n_s$  (称为同步转速)沿逆时针方向旋转,如图5-1所示。

当用原动机拖动该三相感应电机的转子以转速  $n$  旋转,并使其转速

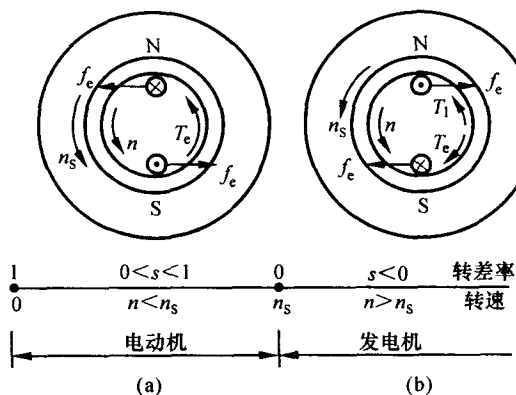


图 5-1 感应电机的运行状态

$n$  高于定子旋转磁场的转速  $n_s$  时, 转子导体将切割定子旋转磁场的磁力线而感应电动势。感应电动势  $e_2$  的方向可用右手定则确定, 如图 5-1(b) 中的“ $\otimes$ ”和“ $\odot$ ”所示。由于转子绕组是一个闭合绕组, 在该电动势的作用下, 转子导体内便有电流通过, 转子电流的有功分量  $i_{2a}$  与转子感应电动势  $e_2$  同相位, 所以  $i_{2a}$  的方向应和  $e_2$  的方向一样。于是, 转子电流的有功分量  $i_{2a}$  与气隙磁场相互作用, 将产生电磁力  $f_e$  和电磁转矩  $T_e$ 。电磁力  $f_e$  的方向可用左手定则确定, 如图 5-1(b) 所示。该电磁力  $f_e$  产生的电磁转矩  $T_e$  为顺时针方向。由于此电磁转矩  $T_e$  的方向与转子的转向相反, 所以, 此时的电磁转矩为制动性质的转矩。为使转子持续以高于旋转磁场的转速旋转, 原动机的驱动转矩  $T_1$  必须克服制动的电磁转矩  $T_e$ 。此时, 转子从原动机吸收机械功率, 通过电磁感应由定子输出电功率, 可见这时感应电机运行于发电机状态。

如果把原动机去掉, 则在制动性质的电磁转矩的作用下, 电机的转速将逐渐降低。当转子的转速  $n$  等于旋转磁场的转速  $n_s$  时, 转子导体与旋转磁场之间无相对运动, 即转子导体不能切割旋转磁场的磁场线, 因此不能产生感应电动势  $e_2$ , 即  $e_2 = 0$ 。所以, 转子导体中无电流通过, 故电磁力  $f_e$  和电磁转矩  $T_e$  均为零。

由于已将原动机去掉, 所以电机转速将继续降低, 当转子转速  $n$  低于  $n_s$  时, 转子导体切割磁力线的方向与发电机运行状态时相反, 因此, 转子感应电动势  $e_2$  和转子电流的有功分量  $i_{2a}$  改变了方向, 电磁力  $f_e$  和电磁转矩  $T_e$  也跟着改变方向, 如图 5-1(a) 所示。从图中可见, 此时电磁转矩  $T_e$  的方向与转子的转向相同, 即电磁转矩  $T_e$  变成了驱动性质的转矩, 它将驱动转子旋转。这时, 感应电机运行于电动机状态。

**5-2** 有一台三相绕线型感应电动机, 若将其定子三相短路, 转子中通入频率为  $f_1$  的三相交流电流, 问气隙旋转磁场相对于转子和相对于空间的转速以及空载时转子的转向?

**答** 若将一台三相绕线型感应电动机的三相定子绕组短路, 而在其对称的三相转子绕组中通入频率为  $f_1$  的三相交流电流时, 将在电动机的气隙中产生一个转子旋转磁场, 又称气隙旋转磁场, 若电动机的极对数为  $p$ , 则该气隙旋转磁场相对于转子的转速为  $n_s = \frac{60f_1}{p}$ , 称为同步

转速。

设转子静止时,气隙旋转磁场的转向为顺时针方向,则气隙旋转磁场的磁力线将切割定子导体而感应电动势  $e_1$ 。由于此时定子为闭合绕组,定子感应电动势  $e_1$  将在定子绕组中产生定子感应电流,定子导体中的感应电流与气隙磁场相互作用,产生电磁力和电磁转矩,该电磁转矩的方向与气隙旋转磁场的方向相同,即该电磁转矩将驱动定子朝顺时针方向(即此时气隙旋转磁场的旋转方向)旋转。但是,由于定子是固定的,根据作用力与反作用力原理,转子将受到与其反方向的力,所以转子将朝逆时针方向旋转,即转子的转向与气隙磁场的旋转方向相反。

设转子的转速为  $n$ , 则气隙旋转磁场相对于转子的转速为  $n_s = \frac{60f_1}{p}$ 。而气隙旋转磁场相对于空间的转速为  $(n_s - n)$ 。

**5-3 三相感应电动机的转速变化时,转子所产生磁动势在空间的转速是否改变?为什么?**

**答** 三相感应电动机的转速变化时,转子电流所产生的磁动势  $F_2$  相对于空间的转速  $n'_2$  是不变的,它总是与气隙旋转磁场的转速  $n_s$  相同,即  $n'_2 = n_s$ 。

设一台三相感应电动机,其极对数为  $p$ 。当在该电动机的定子绕组中通入频率为  $f_1$  的三相交流电流时,将在电动机的气隙中产生一个转速为  $n_s = \frac{60f_1}{p}$  的定子旋转磁场,  $n_s$  称为气隙旋转磁场的同步转速。

当该三相感应电动机以转速  $n$  旋转时,则气隙旋转磁场的磁力线切割转子导体的速度为  $\Delta n = n_s - n = sn_s$  ( $s$  为转差率)。此时,转子绕组中将产生感应电动势  $e_2$ , 其频率

$$f_2 = \frac{p\Delta n}{60} = \frac{psn_s}{60}$$

由于转子绕组是一个闭合绕组,在该转子电动势  $e_2$  的作用下,转子绕组中便有电流通过。转子电流  $i_2$  的频率也为  $f_2$ , 该转子电流  $i_2$  将产生转子旋转磁动势  $F_2$ 。转子旋转磁动势  $F_2$  相对于转子的转速

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60}{p} \times \frac{psn_s}{60} = sn_s$$

因为该三相感应电动机的转子正在以转速  $n$  旋转。所以,转子旋转磁动势  $F_2$  相对于空间的转速为

$$n'_2 = n_2 + n = sn_s + n = (n_s - n) + n = n_s$$

无论三相感应电动机的转速  $n$  如何变化,其转子电流产生的转子旋转磁动势  $F_2$  相对于空间的转速  $n'_2$ ,总是与该电动机气隙旋转磁场的同步转速  $n_s$  相等,而与该电动机的转速  $n$  无关。

**5-4** 频率归算时,用等效的静止转子去代替实际旋转的转子,这样做是否会影响定子边的电流、功率因数、输入功率和电动机的电磁功率?为什么?

**答** 由三相感应电动机的基本结构和工作原理可知,感应电动机的定子绕组与转子绕组之间没有电的直接联系,其定、转子之间只有磁的联系。所以,感应电动机转子边对定子边的影响仅取决于转子旋转磁动势  $F_2$  对定子旋转磁动势  $F_1$  的影响,即仅取决于转子磁动势  $F_2$  的大小和转子磁动势  $F_2$  与定子磁动势  $F_1$  的相对位置。

虽然感应电动机的转速  $n$  变化时,会引起转子电流的频率  $f_2$  发生变化,从而引起转子旋转磁动势  $F_2$  相对于转子的转速  $n_2$  发生变化。但是,无论转子转速  $n$  如何变化,转子旋转磁动势  $F_2$  相对于空间的转速  $n'_2$  总是等于定子旋转磁场的转速(即气隙旋转磁场的同步转速)  $n_s$ ,即  $F_2$  与  $F_1$  总是相对静止的。所以,转子旋转磁动势  $F_2$  对定子旋转磁动势的影响,仅与转子电流的大小和相位有关,而与转子电流的频率  $f_2$  无关。因此,在保证转子电流的大小和相位不变的前提下,可以用等效的静止转子代替实际旋转的转子,即可以进行频率归算。

由于在进行频率归算时,保证了转子电流的大小和相位不变,从而保证了转子旋转磁动势对定子旋转磁动势的影响不变。因此,频率归算时,用等效的静止转子去代替实际旋转的转子,不会影响定子边的电流、功率因数、输入功率和电动机的电磁功率。

**5-5** 三相感应电动机的定、转子回路的频率互不相同,在 T 形等效电路中为什么能把它们联在一起?

**答** 虽然三相感应电动机运行时,转子回路的频率  $f_2$  与定子回路的频率  $f_1$  互不相同。但是,在进行频率归算以后,转子变为静止,相应

地,转子回路的频率  $f_2$  变为  $f_1$ ,即转子回路的频率  $f_2$  与定子回路的频率  $f_1$  相同了。所以,在 T 形等效电路中可以把转子回路与定子回路联在一起。

但是应当注意:频率归算后,转子回路的电阻变为  $\frac{R_2}{s}$ ,漏电抗变为  $X_{2s}$ ,与归算前的转子电阻  $R_2$ 、转子漏电抗  $X_{2s}$  不同了。其中对转子电阻来说,相当于多串入一个附加电阻  $\left(\frac{R_2}{s} - R_2\right) = \frac{1-s}{s}R_2$ ,而转子漏电抗变为转子不动时的漏电抗  $X_{2s}$ 。

**5-6** 感应电动机等效电路中的  $\frac{1-s}{s}R'_2$  代表什么?能否不用电阻而用一个电抗去代替?为什么?

**答** 已知在三相感应电动机中,利用电磁感应作用传递到转子上的电磁功率

$$P_e = m_1 I_2'^2 \frac{R'_2}{s}$$

而感应电动机转子绕组的铜耗

$$p_{Cu2} = m_1 I_2'^2 R'_2$$

从电磁功率  $P_e$  中减去转子绕组铜耗  $p_{Cu2}$  以后,便是产生于感应电动机转子上的总机械功率  $P_n$ ,即

$$P_n = P_e - p_{Cu2}$$

三相异步电动机的等效电路中的电阻  $\frac{1-s}{s}R'_2$  在实际运行的感应电动机中并不存在,但是在实际运行的感应电动机中有机功率输出;而在归算后的等效电路中,因为转子不动,并没有机械功率输出,但却有电功率  $m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s}R'_2$ ,它实际上是模拟了总机械功率,也就是说,可以通过对电功率  $m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s}R'_2$  的计算,间接求出总机械功率  $P_n$ ,即

$$P_n = P_e - p_{Cu2} = m_1 I_2'^2 \frac{R'_2}{s} - m_1 I_2'^2 R'_2 = m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s}R'_2$$

$\frac{1-s}{s}R'_2$  又称为模拟电阻, 即  $\frac{1-s}{s}R'_2$  是代表机械负载的一个纯电阻。因为机械功率是有功功率, 所以  $\frac{1-s}{s}R'_2$  不能用电抗代替。

**5-7** 感应电动机轴上所带的负载增大时, 定子电流就会增大, 试说明其原因和物理过程。

**答** 当感应电动机轴上所带的负载增加时, 电动机的转速将下降, 转子导体切割磁力线的速度增加, 转子绕组的感应电动势、感应电流相应增加, 转子磁动势  $F_2$  也增加。由磁动势平衡关系可知, 定子磁动势  $F_1$  将增加, 因此定子电流  $I_1$  将会增大。

其物理过程如下。

当感应电动机轴上所带的负载增大的瞬间, 电动机的电磁转矩  $T_e$  小于负载转矩  $T_L$ , 使电动机的转速  $n$  下降, 随着转速  $n$  的下降, 转子导体切割气隙旋转磁场的磁力线的速度  $\Delta n = n_s - n$  将增加, 同理, 转子绕组的感应电动势、感应电流相应增加。转子电流的增加, 将会使定子电流增大, 此时, 电动机将会从电网吸收更多的电能。与此同时, 转子电流的增加, 将使电动机的电磁转矩  $T_e$  增大为  $T'_e$ , 当  $T'_e = T_L$  时, 电动机的转速趋于稳定, 即电动机以新的转速  $n'$  稳定运行。

**5-8** 为什么感应电动机的功率因数总是滞后? 试说明原因。

**答** 感应电动机的磁场由交流电流产生, 励磁电流是感性无功电流, 需从电网吸取感性无功功率, 所以感应电动机的功率因数总是滞后的。

另一方面, 从三相感应电动机的等效电路看, 其中有两种参数: 一种是电阻, 一种是感抗。没有容抗。这就使感应电动机不管带多大的机械负载 (即  $\frac{1-s}{s}R'_2$  在变化), 其功率因数总是滞后的。

**5-9** 感应电动机驱动额定负载运行时, 若电源电压下降过多, 往会使电动机过热甚至烧毁, 试说明原因。

**答** 由于感应电动机的电磁转矩  $T_e$  与电源电压的平方成正比, 所以当感应电动机驱动额定负载运行 (即负载转矩  $T_L$  为额定转矩) 时, 在电源电压  $U_1$  下降的瞬间, 将引起电磁转矩  $T_e$  减小, 因为此时电磁转矩  $T_e$  小于负载转矩  $T_L$ , 则转子转速  $n$  必然下降。由于转子转速  $n$  变小, 即

转差率  $s$  增加, 转子回路电阻  $\frac{R'_2}{s}$  将减小。因转子漏电抗  $X'_2$  不变, 从而使转子的内功率因数  $\cos\psi_2$  变小。

另外, 因为主磁通  $\Phi_m$  与电源电压  $U_1$  成正比, 所以, 电源电压  $U_1$  下降, 将会使感应电动机中的主磁通  $\Phi_m$  变小。

由于负载转矩  $T_L$  不变, 因此驱动负载的电磁转矩也必须不变, 才能使转子匀速旋转。电磁转矩  $T_e$  与气隙每极主磁通  $\Phi_m$ 、转子电流  $I_2$  以及转子的内功率因数  $\cos\psi_2$  成正比, 即

$$T_e = C_T \Phi_m I_2 \cos\psi_2$$

从以上分析可知,  $\Phi_m$  变小,  $\cos\psi_2$  变小, 要使电磁转矩  $T_e$  不变, 转子电流  $I_2$  必须增大。因为定子电流  $I_1 \approx I'_2$ , 当  $I_2$  增大时,  $I'_2$  也增大, 所以  $I_1$  也增大。

如果负载转矩为额定转矩, 若电源电压下降过多, 让感应电动机长期低压运行, 则定、转子电流就长期超过额定值, 会使电动机的温升高, 缩短电动机的使用寿命, 甚至会烧毁电动机。

#### 5-10 试说明笼型转子的极数和相数是如何确定的。

答 图 5-2 表示一个笼型转子处于二极气隙磁场里的情况。

设气隙磁场  $B_m$  为正弦分布, 推移速度为同步速度。根据  $e = Blv$ , 每根导条的电动势瞬时值  $e_B$  应正比于该瞬间导条所切割的气隙磁通密度值。所以, 各根导条中感应电动势瞬时值  $e_B$  的分布亦应是正弦波。而且, 这时  $B_m$  和  $e_B$  二波在空间上同相位, 因为导条所在处的磁通密度为最大值时, 该导条的感应电动势也为最大值。由于导条和端环具有电阻和漏电抗, 所以导条电流  $i_B$  要滞后于导条电动势  $e_B$  一个阻抗角  $\psi_2$ ,  $\psi_2$  的大小取决于转子每相的参数。 $B_m$ 、 $e_B$ 、 $i_B$  三波在空间的分布如图 5-2(a) 所示。

根据上述的导条电流波  $i_B$ , 可具体画出转子各导条中的电流分布情况, 如图 5-2(b) 所示。从图中导条电流的分布及流向可以看出, 此时笼型转子产生的也是一个二极磁场。由此可见, 笼型转子本身没有固定的极数, 它的极数完全取决于感生转子电流的气隙磁场的极数, 即笼型转子的极数总是与定子绕组的极数相等, 而与转子导条的数目无关。

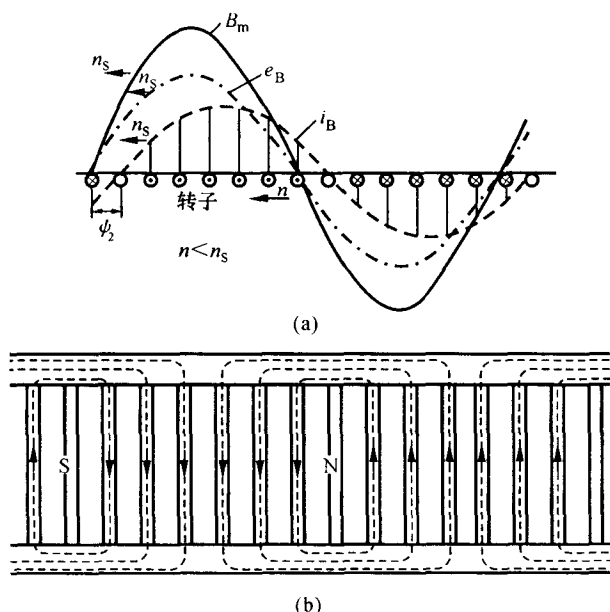
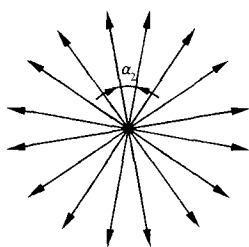


图 5-2 笼型转子的极数

(a) 气隙磁密、导条电动势和电流的空间分布波；

(b) 导条和端环中的电流分布

设笼型转子的导条总数 (即转子槽数) 为  $Q_2$ , 气隙旋转磁场  $B_m$  的极对数为  $p$ 。由于笼型转子的  $Q_2$  根导条均匀地分布在转子圆周上, 则相邻的两根导条在磁场中相隔  $\alpha_2 = \frac{p360^\circ}{Q_2}$  电角度。若  $\frac{Q_2}{p}$  为整数, 则一对磁极下导条的电动

图 5-3 一对极下导条的电动势星形图  
( $Q_2/p$  为整数时)

势相量将组成一个均匀分布的电动势星形图, 如图 5-3 所示。这说明笼型绕组是一个对称多相绕组, 其中每对磁极下的每一根导条构成一相,



所以笼型转子的相数  $m_2 = \frac{Q_2}{p}$ 。各对磁极下占有相同位置的导条,则属于各相的并联导体,即每相有  $p$  根并联导条。

当  $\frac{Q_2}{p} \neq \text{整数}$  时,则各对磁极下将没有占有相同位置的导条(即没有属于同一相的导条),也就是说,整个转子上的每根导条中的感应电动势的相位均互不相同,故可以认为笼型转子的相数  $m_2$  就等于转子导条数(转子槽数)  $Q_2$ ,即  $m_2 = Q_2$ 。

**5-11** 试写出感应电机电磁转矩的三种表达形式:

- (1) 用电磁功率表达;
- (2) 用总机械功率表达;
- (3) 用主磁通、转子电流和转子的内功率因数表达。

**答** (1) 用电磁功率表达时,电磁转矩

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s}$$

式中:  $T_e$  为电磁转矩(N·m);  $P_e$  为电磁功率(W);  $\Omega_s$  为旋转磁场的同步角速度(rad/s)。

(2) 用总机械功率表达时,电磁转矩

$$T_e = \frac{P_\Omega}{\Omega}$$

式中:  $P_\Omega$  为总机械功率(W);  $\Omega$  为转子的机械角速度(rad/s)。

(3) 用主磁通、转子电流和转子的内功率因数表达时,电磁转矩

$$T_e = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_2 N_2 k_{u2} \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = C'_T \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

式中:  $p$  为电机的极对数;  $m_2$  为转子绕组的相数;  $N_2$  为转子绕组每相串联匝数;  $k_{u2}$  为转子绕组因数;  $\Phi_m$  为每极气隙主磁通(Wb);  $I_2$  为转子电流(A);  $\cos \psi_2$  为转子内功率因数;  $C'_T$  为转矩常数,  $C'_T = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_2 N_2 k_{u2}$ ;  $I_2 \cos \psi_2$  为转子电流的有功分量。

**5-12** 一台感应电动机的性能可以从哪些方面和用哪些指标来衡量?

答 表征感应电动机的性能主要有两个方面,即启动性能和运行性能。衡量感应电动机的性能的主要指标有:额定功率因数  $\cos\varphi_N$ 、额定效率  $\eta_N$ 、过载能力(又称最大转矩倍数  $T_{\max}^*/T_N$ )、启动转矩倍数  $T_{st}^* = T_{st}/T_N$ 、启动电流倍数  $I_{st}^* = I_{st}/I_N$  及额定温升  $\theta_N$ (或  $\tau_N$ )。

5-13 有一台 Y 联结、380 V、50 Hz、额定转速为 1440 r/min 的三相绕线型感应电动机,其参数为  $R_1 = 0.4 \Omega$ ,  $R'_2 = 0.4 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 1 \Omega$ ,  $X_m = 40 \Omega$ ,  $R_m$  略去不计,定、转子的电压比为 4。试求:

- (1) 额定负载时的转差率;
- (2) 额定负载时的定、转子电流;
- (3) 额定负载时转子的频率和每相电动势值。

解 用 T 形等效电路计算。

- (1) 额定负载时的转差率  $s_N$ 。

当该电动机的极对数  $p = 1$  时,其同步转速  $n_s = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{1} \text{ r/min} = 3000 \text{ r/min}$ ; 当  $p = 2$  时,  $n_s = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$ 。因为普通三相感应电动机正常运行时,额定转差率  $s_N$  取  $0.02 \sim 0.05$ , 所以可以确定该电动机的极对数  $p = 2$ , 同步转速  $n_s = 1500 \text{ r/min}$ 。因此,该电动机的额定转差率

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1500 - 1444}{1500} = 0.03733 = 3.733\%$$

- (2) 额定负载时的定子电流  $I_1$  和转子电流  $I_2$ 。

因为 Y 联结

$$\text{所以 } U_{1N\Phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 380 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

由于三相绕线型感应电动机的转子绕组的相数  $m_2$  与定子绕组的相数  $m_1$  相同,即  $m_2 = m_1 = 3$ 。

$$k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}} = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} = k_c = 4$$

- ① 转子阻抗

$$Z'_{2s} = \frac{R'_2}{s_N} + jX'_{2s} = \left( \frac{0.4}{0.03733} + j1 \right) \Omega = (10.715 + j1) \Omega$$

$$= 10.761 \angle 5.35^\circ \Omega$$

## ② 励磁阻抗

$$Z_m = R_m + jX_m = (0 + j40) \Omega = 40 \angle 90^\circ \Omega$$

③  $Z'_{2s}$  与  $Z_m$  的并联值

$$Z'_{2s} // Z_m = \frac{Z'_{2s} Z_m}{Z'_{2s} + Z_m} = \frac{10.761 \angle 5.35^\circ \times 40 \angle 90^\circ}{10.715 + j1 + 0 + j40} \Omega$$

$$= \frac{430.44 \angle 95.35^\circ}{10.715 + j41} \Omega = \frac{430.44 \angle 95.35^\circ}{42.377 \angle 75.35^\circ} \Omega$$

$$= 10.157 \angle 20^\circ \Omega = (9.544 + j3.474) \Omega$$

## ④ 总阻抗

$$Z_{\Sigma} = Z_{1s} + Z'_{2s} // Z_m = (0.4 + j1 + 9.544 + j3.474) \Omega$$

$$= (9.944 + j4.474) \Omega = 10.904 \angle 24.22^\circ \Omega$$

⑤ 定子电流  $I_1$ 。

$$I_{1\phi} = \frac{U_{1N\phi}}{Z_{\Sigma}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{10.904 \angle 24.22^\circ} \text{ A} = 20.176 \angle -24.22^\circ \text{ A}$$

## Y 联结

$$I_1 = I_{1\phi} = 20.176 \text{ A}$$

⑥ 转子电流  $I_2$ 。

$$I'_{2\phi} = \frac{I_{1\phi} (Z'_{2s} // Z_m)}{Z'_2} = \frac{20.176 \angle -24.22^\circ \times 10.157 \angle 20^\circ}{10.761 \angle 5.35^\circ} \text{ A}$$

$$= 19.04 \angle -9.57^\circ \text{ A}$$

## Y 联结

$$I'_2 = I'_{2\phi} = 19.04 \text{ A}$$

$$I_2 = k_1 I'_2 = 4 \times 19.04 \text{ A} = 76.16 \text{ A}$$

(3) 额定负载时转子的频率  $f_2$  和每相电动势  $E_{2\phi}$ 。

## ① 转子频率

$$f_2 = s_N f_1 = 0.03733 \times 50 \text{ Hz} = 1.867 \text{ Hz}$$

② 转子每相电动势  $E_{2\phi}$ 。

$$\begin{aligned} E'_{2\phi} &= I'_{2\phi} \cdot Z'_{2\sigma} = 19.04 \angle -9.57^\circ \times 10.761 \angle 5.35^\circ \text{ V} \\ &= 204.89 \angle -4.22^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$E_{2\phi} = \frac{1}{k_e} E'_{2\phi} = \frac{1}{4} \times 204.89 \text{ V} = 51.22 \text{ V}$$

**5-14** 有一台三相四极的笼型感应电动机,电动机的额定功率  $P_N = 17 \text{ kW}$ ,  $U_{1N} = 380 \text{ V}$  ( $\Delta$  联结), 参数为  $R_1 = 0.715 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = 1.74 \Omega$ ,  $R'_2 = 0.416 \Omega$ ,  $X'_{2\sigma} = 3.03 \Omega$ ,  $R_m = 6.2 \Omega$ ,  $X_m = 75 \Omega$ , 电动机的机械损耗  $p_\Omega = 139 \text{ W}$ , 额定负载时的杂散损耗  $p_\Delta = 320 \text{ W}$ 。试求额定负载时的转差率、定子电流、定子功率因数、电磁转矩、输出转矩和效率。

**解** 用 T 形等效电路计算。

(1) 定子电流  $I_1$  和定子功率因数  $\cos\varphi_1$ 。

设额定转差率  $s_N = 0.02$  (试探值)。

① 转子阻抗

$$\begin{aligned} Z'_{2\sigma} &= \frac{R'_2}{s_N} + jX'_{2\sigma} = \left( \frac{0.416}{0.02} + j3.03 \right) \Omega = (20.8 + j3.03) \Omega \\ &= 21.02 \angle 8.29^\circ \Omega \end{aligned}$$

② 励磁阻抗

$$Z_m = R_m + jX_m = (6.2 + j75) \Omega = 75.256 \angle 85.27^\circ \Omega$$

③  $Z'_{2\sigma}$  与  $Z_m$  的并联值

$$\begin{aligned} Z'_{2\sigma} // Z_m &= \frac{Z'_{2\sigma} Z_m}{Z'_{2\sigma} + Z_m} = \frac{21.02 \angle 8.29^\circ \times 75.256 \angle 85.27^\circ}{20.8 + j3.03 + 6.2 + j75} \Omega \\ &= \frac{1581.88 \angle 93.56^\circ}{27 + j78.03} \Omega = \frac{1581.88 \angle 93.56^\circ}{82.569 \angle 70.91^\circ} \Omega \\ &= 19.158 \angle 22.65^\circ \Omega = (17.68 + j7.378) \Omega \end{aligned}$$

④ 总阻抗

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma} &= Z_{1\sigma} + Z'_{2\sigma} // Z_m = (0.715 + j1.74 + 17.68 + j7.378) \Omega \\ &= (18.395 + j9.118) \Omega = 20.531 \angle 26.37^\circ \Omega \end{aligned}$$

⑤ 定子相电流  $I_{1\phi}$  和定子线电流  $I_1$ 。

$$\begin{aligned} I_{1\phi} &= \frac{U_{1N\phi}}{Z_{\Sigma}} = \frac{380 \angle 0^\circ}{20.531 \angle 26.37^\circ} \text{ A} = 18.51 \angle -26.37^\circ \text{ A} \\ I_1 &= 18.51 \text{ A} \end{aligned}$$

△ 联结, 则

$$I_1 = \sqrt{3} I_{1\phi} = \sqrt{3} \times 18.51 \text{ A} = 32.06 \text{ A}$$

⑥ 定子功率因数

$$\cos\varphi_1 = \cos 26.37^\circ = 0.896$$

(2) 转子相电流  $I'_{2\phi}$  和励磁电流  $I_{m\phi}$ 。

① 转子相电流

$$I'_{2\phi} = I_{1\phi} \left| \frac{Z_m}{Z'_{2s} + Z_m} \right| = 18.51 \times \frac{75.256}{82.569} \text{ A} = 16.87 \text{ A}$$

② 励磁电流

$$I_{m\phi} = I_{1\phi} \left| \frac{Z'_{2s}}{Z'_{2s} + Z_m} \right| = 18.51 \times \frac{21.02}{82.569} \text{ A} = 4.71 \text{ A}$$

(3) 总损耗  $\sum p$ 。

① 定子铜耗

$$p_{Cu1} = 3 I_{1\phi}^2 R_1 = 3 \times 18.51^2 \times 0.715 \text{ W} = 734.92 \text{ W}$$

② 转子铜耗

$$p_{Cu2} = 3 I_{2\phi}'^2 R_2' = 3 \times 16.87^2 \times 0.416 \text{ W} = 355.18 \text{ W}$$

③ 铁耗

$$p_{Fe} = 3 I_{m\phi}^2 R_m = 3 \times 4.71^2 \times 6.2 \text{ W} = 412.62 \text{ W}$$

④ 总损耗

$$\begin{aligned} \sum p &= p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe} + p_{\Omega} + p_{\Delta} \\ &= (734.92 + 355.18 + 412.62 + 139 + 320) \text{ W} \\ &= 1961.72 \text{ W} \end{aligned}$$

(4) 输入功率  $P_1$ 、输出功率  $P_2$  和效率  $\eta$ 。

① 输入功率

$$\begin{aligned} P_1 &= 3 U_{1\phi} I_{1\phi} \cos\varphi_1 = 3 \times 380 \times 18.51 \times 0.896 \text{ W} \\ &= 18906.85 \text{ W} \end{aligned}$$

② 输出功率

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - \sum p = (18906.85 - 1961.72) \text{ W} \\ &= 16945.13 \text{ W} \approx 17 \text{ kW} \end{aligned}$$

可见,在所设  $s_N = 0.02$  下,输出功率  $P_2 \approx P_N = 17 \text{ kW}$ ,符合题目要求。不需再重新假定  $s_N$ 。

③ 效率

$$\eta = 1 - \frac{\sum p}{P_1} = 1 - \frac{1961.72}{18906.85} = 89.6\%$$

(5) 电磁转矩  $T_e$  和输出转矩  $T_2$ 。

① 同步转速

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

② 额定转速

$$n_N = (1 - s_N)n_s = (1 - 0.02) \times 1500 \text{ r/min} = 1470 \text{ r/min}$$

③ 额定角速度

$$\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = \frac{2\pi \times 1470}{60} \text{ rad/s} = 153.86 \text{ rad/s}$$

④ 总机械功率

$$P_\Omega = 3I_2'^2 \frac{1 - s_N}{s_N} R_2' = 3 \times 16.87^2 \times \frac{1 - 0.02}{0.02} \times 0.416 \text{ W} \\ = 17403.67 \text{ W}$$

⑤ 电磁转矩

$$T_e = \frac{P_\Omega}{\Omega_N} = \frac{17403.67}{153.86} \text{ N} \cdot \text{m} = 113.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

⑥ 输出转矩

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega_N} = \frac{16945.13}{153.86} \text{ N} \cdot \text{m} = 110.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**5-15** 设习题 5-14 的感应电动机由 380 V 的电源经三相配电线路供电,线路的每相阻抗  $Z_L = (0.05 + j0.15) \Omega$ ,试求电动机输出额定功率时电动机的实际端电压。

**解** 用 T 形等效电路计算。

(1) 定子相电流  $I_{1\phi}$  和定子功率因数  $\cos\varphi_1$ 。

设额定转差率  $s_N = 0.0204$  (试探值)

① 转子阻抗

$$Z'_{2s} = \frac{R'_2}{s_N} + jX'_{2s} = \left( \frac{0.416}{0.0204} + j3.03 \right) \Omega = (20.39 + j3.03) \Omega$$

$$= 20.61 \angle 8.38^\circ \Omega$$

## ② 励磁阻抗

$$Z_m = R_m + jX_m = (6.2 + j75) \Omega = 75.26 \angle 85.27^\circ \Omega$$

③  $Z'_{2s}$  与  $Z_m$  的并联值

$$Z'_{2s} // Z_m = \frac{Z'_{2s} Z_m}{Z'_{2s} + Z_m} = \frac{20.61 \angle 8.38^\circ \times 75.26 \angle 85.27^\circ}{20.39 + j3.03 + 6.2 + j75} \Omega$$

$$= \frac{1551.11 \angle 93.65^\circ}{26.59 + j78.03} \Omega = \frac{1551.11 \angle 93.65^\circ}{82.44 \angle 71.18^\circ} \Omega$$

$$= 18.82 \angle 22.47^\circ \Omega = (17.39 + j7.19) \Omega$$

## ④ 电动机与线路的总阻抗

$$Z_{\Sigma} = Z_L + Z_{1s} + Z'_{2s} // Z_m = (0.05 + j0.15 + 0.715$$

$$+ j1.74 + 17.39 + j7.19) \Omega$$

$$= (18.16 + j9.08) \Omega = 20.30 \angle 26.55^\circ \Omega$$

## ⑤ 定子相电流

$$I_{1\phi} = \frac{U_{1\phi} \angle 0^\circ}{Z_{\Sigma}} = \frac{380 \angle 0^\circ}{20.30 \angle 26.55^\circ} \text{ A} = 18.72 \angle -26.55^\circ \text{ A}$$

## ⑥ 定子功率因数

$$\cos \varphi_1 = \cos 26.55^\circ = 0.8945$$

(2) 转子相电流  $I'_{2\phi}$  和励磁电流  $I_{m\phi}$ 。

## ① 转子相电流

$$I'_{2\phi} = I_{1\phi} \left| \frac{Z_m}{Z'_{2s} + Z_m} \right| = 18.72 \times \frac{75.26}{82.44} \text{ A} = 17.09 \text{ A}$$

## ② 励磁电流

$$I_{m\phi} = I_{1\phi} \left| \frac{Z'_{2s}}{Z'_{2s} + Z_m} \right| = 18.72 \times \frac{20.61}{82.44} \text{ A} = 4.68 \text{ A}$$

(3) 总损耗  $\sum p$ 。

## ① 定子铜耗

$$p_{Cu1} = 3I_{1\phi}^2 R_1 = 3 \times 18.72^2 \times 0.715 \text{ W} = 751.69 \text{ W}$$

## ② 转子铜耗

$$p_{\text{Cu2}} = 3I_{2\phi}'^2 R_2' = 3 \times 17.09^2 \times 0.416 \text{ W} = 364.50 \text{ W}$$

③ 铁耗

$$p_{\text{Fe}} = 3I_{\text{m}\phi}^2 R_{\text{m}} = 3 \times 4.68^2 \times 6.2 \text{ W} = 407.38 \text{ W}$$

④ 线路损耗

$$p_{\text{CuL}} = 3I_{1\phi}^2 R_{\text{L}} = 3 \times 18.72^2 \times 0.05 \text{ W} = 52.57 \text{ W}$$

⑤ 电动机与线路总损耗

$$\begin{aligned} \sum p &= p_{\text{Cu1}} + p_{\text{Cu2}} + p_{\text{Fe}} + p_{\text{a}} + p_{\Delta} + p_{\text{CuL}} \\ &= (751.69 + 364.50 + 407.38 + 139 + 320 + 52.57) \text{ W} \\ &= 2035.14 \text{ W} \end{aligned}$$

(4) 输入功率  $P_1$  和输出功率  $P_2$ 。

① 总输入功率

$$\begin{aligned} P_1 &= 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos\varphi_1 = 3 \times 380 \times 18.72 \times \cos 26.55^\circ \text{ W} \\ &= 19089.34 \text{ W} \end{aligned}$$

② 输出功率

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - \sum p = (19089.34 - 2035.14) \text{ W} \\ &= 17054.2 \text{ W} \approx 17 \text{ kW} \end{aligned}$$

可见,在所设  $s_N = 0.0204$  下,输出功率  $P_2 \approx P_N = 17 \text{ kW}$ ,符合题目要求。不需再重新假定  $s_N$ 。

(5) 输出额定功率时电动机的实际端电压  $U_1$ 。

① 实际相电压

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1\phi} &= \dot{I}_{1\phi} (Z_{1\sigma} + Z_{2\sigma}' // Z_{\text{m}}) \\ &= 18.72 \angle -26.55^\circ \times (0.715 + \text{j}1.74 + 17.39 + \text{j}7.19) \text{ V} \\ &= 18.72 \angle -26.55^\circ \times (18.11 + \text{j}8.93) \text{ V} \\ &= 18.72 \angle -26.55^\circ \times 20.19 \angle 26.24^\circ \text{ V} \\ &= 377.96 \angle -0.31^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

② 实际端电压(线电压)  $U_1$ 。

$\Delta$  联结,端电压

$$U_1 = U_{1\phi} = 377.96 \text{ V}$$

5-16 增大转子电阻或漏电抗对感应电动机的启动电流、启动转



矩和最大转矩有何影响?

答 (1) 启动电流

$$I_{st} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}}$$

式中:  $R'_2 = k_e k_i R_2$ ;  $X'_{2\sigma} = k_e k_i X_{2\sigma}$ ;  $c = |\dot{c}| \approx 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m}$ 。

所以增大转子电阻  $R_2$  或转子漏电抗  $X_{2\sigma}$  均使启动电流  $I_{st}$  减小。

(2) 启动转矩

$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$

式中:  $\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$ 。

增大转子漏抗  $X_{2\sigma}$  会使启动转矩  $T_{st}$  减小; 由于在正常情况下,  $(R_1 + cR'_2) \ll (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})$ , 故一般增大转子电阻  $R_2$  可使启动转矩  $T_{st}$  增加。

(3) 最大转矩

$$T_{max} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2}{2c[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}]}$$

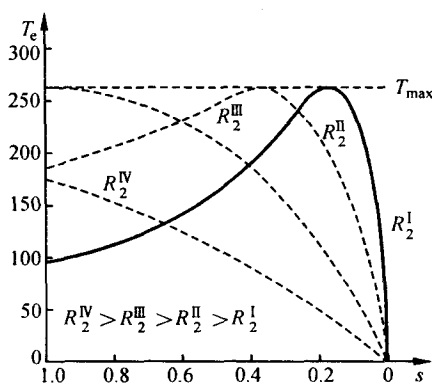
$$s_m = \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}}$$

所以最大转矩  $T_{max}$  与转子电阻  $R_2$  无关, 但临界转差率  $s_m$  随转子电阻  $R_2$  的增大而增大, 故一般启动转矩  $T_{st}$  随之增大; 如果增大转子漏电抗  $X_{2\sigma}$ , 则最大转矩  $T_{max}$  减小。

5-17 试述转子电阻、电源电压对感应电动机  $T_e-s$  曲线的影响。

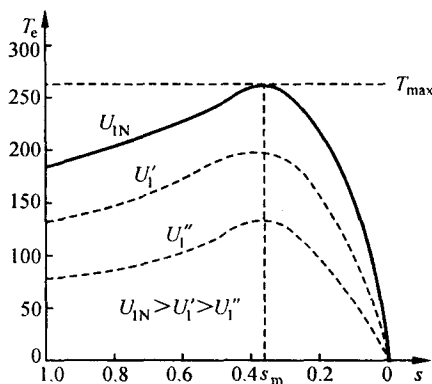
答 由感应电动机启动转矩  $T_{st}$ 、最大转矩  $T_{max}$  和临界转差率  $s_m$  的表达式(见习题 5-16)可知:

(1) 最大转矩  $T_{max}$  与转子电阻  $R_2$  无关, 即增大转子电阻后, 感应电动机的最大转矩  $T_{max}$  不变, 但是与最大转矩  $T_{max}$  对应的临界转差率  $s_m$  将随转子电阻  $R_2$  的增大而增大, 与此同时启动转矩也随之逐渐增大, 当  $s_m = 1$  时,  $T_{st} = T_{max}$ , 即启动转矩达到最大值, 若此时继续增大转子电阻  $R_2$ , 则启动转矩  $T_{st}$  反而开始逐渐减小, 转子电阻变化时的  $T_e-s$  曲

图 5-4 转子电阻变化时的  $T_e-s$  曲线

线如图 5-4 所示；

(2) 当电源电压  $U_1$  减小时, 启动转矩  $T_{st}$  和最大转矩  $T_{max}$  均随之减小, 但是, 与最大转矩  $T_{max}$  所对应的临界转差率  $s_m$  始终不变, 电源电压变化时的  $T_e-s$  曲线如图 5-5 所示。

图 5-5 电源电压变化时的  $T_e-s$  曲线

**5-18** 三相感应电动机的参数如何测定? 如何利用参数算出电动机的主要性能数据?

答 (1) 感应电动机参数的测定。

① 利用电桥可以测得定子绕组的电阻  $R_1$ 。

② 通过堵转(短路)试验,可以测定短路阻抗  $Z_K$ 、短路电阻  $R_K$  和短路电抗  $X_K$ ,再进一步求出定、转子绕组的参数,即

$$R'_2 = R_K - R_1$$

$$X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma} \approx \frac{X_K}{2}$$

③ 通过空载试验,可以测定励磁电阻  $R_m$ 、励磁电抗  $X_m$  和励磁阻抗  $Z_m$ 。

(2) 由参数算出感应电动机的主要性能数据。

① 在参数已知的情况下,给定转差率  $s$ ,根据 T 形等效电路可算出定、转子电流和励磁电流。并可算出电动机的功率因数。

② 定、转子电流求出后,即可算出定、转子铜耗,电磁功率,总机械功率,电磁转矩和输入功率。若已知机械损耗和杂散损耗时,可进一步算出输出功率和电动机的效率。

③ 采用对应于  $s = s_m$  时的漏电抗值,可较准确地算出最大转矩;采用对应于  $s = 1$  时的漏电抗值,可较准确地算出启动转矩。

计算额定点的数据时,应先假定一个额定转差率  $s_N$ ,然后看算出的输出功率是否等于额定功率。如果不等,可利用输出功率近似正比于转差率这一关系,重新假定一个额定转差率,进行重算,直到输出功率等于额定功率为止。

**5-19** 有一台 50 Hz、380 V 的三相感应电动机,若运行在 60 Hz 的 380 V 电源上,问电动机的最大转矩、启动转矩和启动电流有何变化?

答 因为  $\Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$ ,所以频率  $f$  增加,将会使同步角速度  $\Omega_s$  升高。

又因为  $X_{\sigma} = 2\pi f L_{\sigma}$ ,所以频率  $f$  增加,将会使定子漏电抗  $X_{1\sigma}$  和转子漏电抗  $X_{2\sigma}$  增大。

$$\text{因为 } T_{\max} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2}{2c[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}]}$$

$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$

$$I_{st} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}}$$

所以当电源电压一定,而电源频率升高后,由于感应电动机的同步角速度  $\Omega_s$ 、定子漏电抗  $X_{1\sigma}$  和转子漏电抗  $X_{2\sigma}$  均随频率  $f$  的升高而增大,故将导致感应电动机的最大转矩  $T_{\max}$ 、启动转矩  $T_{st}$  和启动电流均减小。

**5-20** 有一台 50 Hz 的三相感应电动机,其铭牌数据为  $P_N = 10$  kW,  $2p = 4$ ,  $U_{1N} = 380$  V, Y 联结,  $I_{1N} = 19.8$  A。已知  $R_1 = 0.5 \Omega$ ; 空载试验数据:  $U_1 = 380$  V,  $I_{10} = 5.4$  A,  $P_{10} = 425$  W,  $p_n = 170$  W; 短路试验数据如下表所示。

$U_{1K}(\text{线})/\text{V}$	200	160	120	80	40
$I_{1K}/\text{A}$	36	27	18.1	10.5	4
$P_{1K}/\text{W}$	3680	2080	920	290	40

试求:  $X_{1\sigma}$ 、 $X'_{2\sigma}$ 、 $R'_2$  和  $X_m$  (设  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$ ), 额定电流  $I_{1N}$  和额定功率因数  $\cos\varphi_N$  (杂散损耗设为  $1\%P_N$ , 用 T 形等效电路确定),  $T_{\max}$ 。

**解** (1) 定子漏电抗  $X_{1\sigma}$ 、转子漏电抗  $X'_{2\sigma}$  和转子电阻  $R'_2$ 。

欲计算  $I_{1K} = I_{1N}$  时的参数, 应先用插值法求出  $I_{1K} = I_{1N}$  时的试验数据, 即先求出与  $I_{1K} = I_{1N} = 19.8$  A 对应的  $U_{1K}$  和  $P_{1K}$ 。

根据  $\frac{160 - 120}{27 - 18.1} = \frac{160 - U_{1K}}{27 - 19.8}$  可以求出  $U_{1K} = 127.64$  V; 同理, 根据

$\frac{2080 - 920}{27 - 18.1} = \frac{2080 - P_{1K}}{27 - 19.8}$  可以求出  $P_{1K} = 1141.57$  W。

因为电动机为 Y 联结, 则有

$$U_{1K\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1K} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 127.64 \text{ V} = 73.695 \text{ V}$$

$$I_{1K\phi} = I_{1K} = 19.8 \text{ A}$$

① 短路阻抗

$$Z_K = \frac{U_{1K\phi}}{I_{1K\phi}} = \frac{73.695}{19.8} \Omega = 3.722 \Omega$$

② 短路电阻

$$R_K = \frac{P_{1K}}{m_1 I_{1K\phi}^2} = \frac{1141.57}{3 \times 19.8^2} \Omega = 0.971 \Omega$$

## ③ 短路电抗

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{3.722^2 - 0.971^2} \Omega = 3.593 \Omega$$

④ 定子漏电抗  $X_{1\sigma}$  和转子漏电抗  $X'_{2\sigma}$  为

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_K}{2} = \frac{3.593}{2} \Omega = 1.797 \Omega$$

## ⑤ 转子电阻

$$R'_2 = R_K - R_1 = (0.971 - 0.5) \Omega = 0.471 \Omega$$

(2) 励磁电抗  $X_m$  和励磁电阻  $R_m$ 。

因为电动机为 Y 联结, 则有

$$U_{10\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{10} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 380 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

$$I_{10\phi} = I_{10} = 5.4 \text{ A}$$

## ① 空载阻抗

$$Z_0 = \frac{U_{10\phi}}{I_{10\phi}} = \frac{220}{5.4} \Omega = 40.74 \Omega$$

## ② 空载电阻

$$R_0 = \frac{P_{10}}{m_1 I_{10\phi}^2} = \frac{425}{3 \times 5.4^2} \Omega = 4.858 \Omega$$

## ③ 空载电抗

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{40.74^2 - 4.858^2} \Omega = 40.45 \Omega$$

## ④ 励磁电抗

$$X_m = X_0 - X_{1\sigma} = (40.45 - 1.797) \Omega = 38.65 \Omega$$

## ⑤ 铁耗

$$\begin{aligned} p_{Fe} &= P_{10} - 3 I_{10\phi}^2 R_1 - p_n = (425 - 3 \times 5.4^2 \times 0.5 - 170) \text{ W} \\ &= 211.26 \text{ W} \end{aligned}$$

## ⑥ 励磁电阻

$$R_m = \frac{p_{Fe}}{m_1 I_{10\phi}^2} = \frac{211.26}{3 \times 5.4^2} \Omega = 2.415 \Omega$$

(3) 定子额定电流  $I_{1N}$  和定子额定功率因数  $\cos\varphi_{1N}$ 。

设额定转差率  $s_N = 0.047$  (试探值)。

## ① 转子阻抗

$$Z'_{2s} = \frac{R'_2}{s_N} + jX'_{2s} = \left( \frac{0.471}{0.047} + j1.797 \right) \Omega = (10.02 + j1.797) \Omega$$

$$= 10.181 \angle 10.207^\circ \Omega$$

## ② 励磁阻抗

$$Z_m = R_m + jX_m = (2.415 + j38.65) \Omega = 38.725 \angle 86.42^\circ \Omega$$

③  $Z'_{2s}$  和  $Z_m$  的并联值

$$Z'_{2s} // Z_m = \frac{Z'_{2s} Z_m}{Z'_{2s} + Z_m} = \frac{10.181 \angle 10.207^\circ \times 38.725 \angle 86.42^\circ}{10.02 + j1.797 + 2.415 + j38.65} \Omega$$

$$= \frac{394.259 \angle 96.63^\circ}{12.435 + j40.447} \Omega = \frac{394.259 \angle 96.63^\circ}{42.315 \angle 72.91^\circ} \Omega$$

$$= 9.317 \angle 23.72^\circ \Omega = (8.53 + j3.748) \Omega$$

## ④ 总阻抗

$$Z_{\Sigma} = Z_{1s} + Z'_{2s} // Z_m = (0.5 + j1.797 + 8.53 + j3.748) \Omega$$

$$= (9.03 + j5.545) \Omega = 10.597 \angle 31.55^\circ \Omega$$

⑤ 定子额定相电流  $I_{1N\phi}$  和定子额定电流  $I_{1N}$ 。

$$I_{1N\phi} = \frac{U_{1N} \angle 0^\circ}{Z_{\Sigma}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{10.597 \angle 31.55^\circ} \text{ A} = 20.761 \angle -31.55^\circ \text{ A}$$

Y 联结, 则有

$$I_{1N} = I_{1N\phi} = 20.761 \text{ A}$$

## ⑥ 额定功率因数

$$\cos \varphi_N = \cos 31.55^\circ = 0.852$$

(4) 转子电流  $I'_{2\phi}$  和励磁电流  $I_{m\phi}$ 。

## ① 转子电流

$$I'_{2\phi} = I_{1N\phi} \left| \frac{Z_m}{Z'_{2s} + Z_m} \right| = 20.761 \times \frac{38.725}{42.315} \text{ A} = 19.00 \text{ A}$$

## ② 励磁电流

$$I_{m\phi} = I_{1N\phi} \left| \frac{Z'_{2s}}{Z'_{2s} + Z_m} \right| = 20.761 \times \frac{10.181}{42.315} \text{ A} = 4.995 \text{ A}$$

(5) 总损耗  $\sum p$ 。

## ① 定子铜耗

$$p_{\text{Cu1}} = 3I_{1N\phi}^2 R_1 = 3 \times 20.761^2 \times 0.5 \text{ W} = 646.528 \text{ W}$$

## ② 转子铜耗

$$p_{Cu2} = 3I_{2s}'^2 R_2' = 3 \times 19.00^2 \times 0.471 \text{ W} = 510.093 \text{ W}$$

## ③ 铁耗

$$p_{Fe} = 3I_{m\phi}^2 R_m = 3 \times 4.995^2 \times 2.415 \text{ W} = 180.77 \text{ W}$$

## ④ 杂散损耗

$$p_{\Delta} = 1\% P_N = 1\% \times 10000 \text{ W} = 100 \text{ W}$$

## ⑤ 总损耗

$$\begin{aligned} \sum p &= p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe} + p_{\Omega} + p_{\Delta} \\ &= (646.528 + 510.093 + 180.77 + 170 + 100) \text{ W} \\ &= 1607.39 \text{ W} \end{aligned}$$

(6) 输入功率  $P_1$  和输出功率  $P_2$ 。

## ① 输入功率

$$\begin{aligned} P_1 &= 3U_{1N\phi} I_{1N\phi} \cos \varphi_N = 3 \times 220 \times 20.761 \times 0.852 \text{ W} \\ &= 11674.33 \text{ W} \end{aligned}$$

## ② 输出功率

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - \sum p = (11674.33 - 1607.39) \text{ W} \\ &= 10066.94 \text{ W} \approx 10 \text{ kW} \end{aligned}$$

可见,在所设  $s_N = 0.047$  下,输出功率  $P_2 \approx P_N = 10 \text{ kW}$ ,符合题目要求,不需再重新假定  $s_N$ 。

(7) 最大转矩  $T_{\max}$ 。

## ① 同步角速度

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi \times 50}{2} \text{ rad/s} = 157 \text{ rad/s}$$

## ② 修正系数

$$c \approx 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m} = 1 + \frac{1.797}{38.65} = 1.046$$

## ③ 最大转矩

$$T_{\max} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1\phi}^2}{2c[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}]}$$

$$= \frac{3}{157} \times \frac{220^2}{2 \times 1.046 \times [0.5 + \sqrt{0.5^2 + (1.797 + 1.046 \times 1.797)^2}]} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$= 105.0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**5-21** 有一台笼型感应电动机,  $P_N = 17 \text{ kW}$ ,  $2p = 4$ ,  $U_{1N} = 380 \text{ V}$ , Y联结, 电动机的参数为  $X_{1\sigma} = 0.55 \Omega$ ,  $X'_{2\sigma} = 0.75 \Omega$ ,  $X_m = 18.5 \Omega$ ,  $R_m$  略去不计,  $R_1 = 0.228 \Omega$ ,  $R'_2 = 0.224 \Omega$ , 铁耗  $p_{Fe} = 350 \text{ W}$ , 机械损耗  $p_\Omega = 250 \text{ W}$ , 额定负载时的杂散损耗  $p_\Delta = 0.5\% P_N$ . 试求: 定子额定电流, 额定功率因素, 额定效率, 额定转速, 最大转矩, 启动转矩, 启动电流, 电磁转矩。

设发生最大转矩时, 定、转子漏电抗为上述给定值的 90%, 启动时为给定值的 80%。

**解** 电动机为 Y 联结, 则有

$$U_{1N\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 380 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

(1) 定子额定电流  $I_{1N}$  和额定功率因数  $\cos\varphi_N$ 。

设额定转差率  $s_N = 0.033$  (试探值)。

① 转子阻抗

$$Z'_{2\sigma} = \frac{R'_2}{s_N} + jX'_{2\sigma} = \left( \frac{0.224}{0.033} + j0.75 \right) \Omega = (6.788 + j0.75) \Omega$$

$$= 6.829 \angle 6.28^\circ \Omega$$

② 励磁阻抗

$$Z_m = R_m + jX_m = (0 + j18.5) \Omega = 18.5 \angle 90^\circ \Omega$$

③  $Z'_{2\sigma}$  和  $Z_m$  的并联值

$$Z'_{2\sigma} // Z_m = \frac{Z'_{2\sigma} Z_m}{Z'_{2\sigma} + Z_m} = \frac{6.829 \angle 6.28^\circ \times 18.5 \angle 90^\circ}{6.788 + j0.75 + 0 + j18.5} \Omega$$

$$= \frac{126.337 \angle 96.28^\circ}{6.788 + j19.25} \Omega = \frac{126.337 \angle 96.28^\circ}{20.412 \angle 70.58^\circ} \Omega$$

$$= 6.189 \angle 25.7^\circ \Omega = (5.577 + j2.684) \Omega$$

④ 总阻抗

$$Z_\Sigma = Z_{1\sigma} + Z'_{2\sigma} // Z_m = (0.228 + j0.55 + 5.577 + j2.684) \Omega$$

$$= (5.805 + j3.234) \Omega = 6.645 \angle 29.12^\circ \Omega$$



⑤ 定子额定相电流  $I_{1N\phi}$  和定子额定电流  $I_{1N}$ 。

$$I_{1N\phi} = \frac{U_{1N\phi} \angle 0^\circ}{Z_{\Sigma}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{6.645 \angle 29.12^\circ} \text{ A} = 33.11 \angle -29.12^\circ \text{ A}$$

定子绕组为 Y 联结, 则有

$$I_{1N} = I_{1N\phi} = 33.11 \text{ A}$$

⑥ 额定功率因数

$$\cos\varphi_N = \cos 29.12^\circ = 0.874$$

(2) 转子相电流  $I'_{2\phi}$  和励磁电流  $I_{m\phi}$ 。

① 转子相电流

$$I'_{2\phi} = I_{1N\phi} \left| \frac{Z_m}{Z'_{2s} + Z_m} \right| = 33.11 \times \frac{18.5}{20.412} \text{ A} = 30.01 \text{ A}$$

② 励磁电流

$$I_{m\phi} = I_{1N\phi} \left| \frac{Z'_{2s}}{Z'_{2s} + Z_m} \right| = 33.11 \times \frac{6.829}{20.412} \text{ A} = 11.077 \text{ A}$$

(3) 总损耗  $\sum p$ 。

① 定子铜耗

$$p_{Cu1} = 3I_{1N\phi}^2 R_1 = 3 \times 33.11^2 \times 0.228 \text{ W} = 749.85 \text{ W}$$

② 转子铜耗

$$p_{Cu2} = 3I_{2\phi}^2 R'_2 = 3 \times 30.01^2 \times 0.224 \text{ W} = 605.20 \text{ W}$$

③ 杂散损耗

$$p_{\Delta} = 0.5\% P_N = 0.5\% \times 17000 \text{ W} = 85 \text{ W}$$

④ 总损耗

$$\begin{aligned} \sum p &= p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe} + p_{\Omega} + p_{\Delta} \\ &= (749.85 + 605.20 + 350 + 250 + 85) \text{ W} \\ &= 2040.05 \text{ W} \end{aligned}$$

(4) 额定效率  $\eta_N$ 。

① 输入功率

$$\begin{aligned} P_1 &= 3U_{1N\phi} I_{1N\phi} \cos\varphi_N = 3 \times 220 \times 33.11 \times 0.874 \text{ W} \\ &= 19099.17 \text{ W} \end{aligned}$$

② 输出功率

$$P_2 = P_1 - \sum p = (19099.17 - 2040.05) \text{ W} \\ = 17059.1 \text{ W} \approx 17 \text{ kW}$$

可见,在所设  $s_N = 0.033$  下,输出功率  $P_2 \approx P_N = 17 \text{ kW}$ ,符合题目要求,不需再重新假定  $s_N$ 。

### ③ 额定效率

$$\eta_N = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{17059.1}{19099.17} \times 100\% = 89.3\%$$

### (5) 额定转速 $n_N$ 。

#### ① 同步转速

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

#### ② 额定转速

$$n_N = (1 - s_N)n_s = (1 - 0.033) \times 1500 \text{ r/min} = 1450.5 \text{ r/min}$$

### (6) 最大转矩 $T_{\max}$ 。

已知发生最大转矩时:  $X_{1\sigma} = 90\% \times 0.55 \Omega = 0.495 \Omega$ ;  $X'_{2\sigma} = 90\% \times 0.75 \Omega = 0.675 \Omega$ 。

#### ① 同步角速度

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi \times 50}{2} \text{ rad/s} = 157 \text{ rad/s}$$

#### ② 修正系数

$$c \approx 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m} = 1 + \frac{0.495}{18.5} = 1.027$$

#### ③ 最大转矩

$$T_{\max} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1N}^2}{2c[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}]} \\ = \frac{3}{157} \times \frac{220^2}{2 \times 1.027 \times [0.228 + \sqrt{0.228^2 + (0.495 + 1.027 \times 0.675)^2}]} \text{ N} \cdot \text{m} \\ = 313.12 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### (7) 启动转矩 $T_{st}$ 和启动电流 $I_{st}$ 。

已知启动时:  $X_{1\sigma} = 80\% \times 0.55 \Omega = 0.44 \Omega$ ;  $X'_{2\sigma} = 80\% \times 0.75 \Omega = 0.6 \Omega$ 。

① 修正系数  $c \approx 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m} = 1 + \frac{0.44}{18.5} = 1.024$

② 启动转矩

$$\begin{aligned} T_{st} &= \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1N}^2 R_2'}{(R_1 + cR_2')^2 + (X_{1\sigma} + cX_{2\sigma}')^2} \\ &= \frac{3}{157} \times \frac{220^2 \times 0.224}{(0.228 + 1.024 \times 0.224)^2 + (0.44 + 1.024 \times 0.6)^2} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 156.83 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

③ 启动电流

$$\begin{aligned} I_{st} &= \frac{U_{1N}}{\sqrt{(R_1 + cR_2')^2 + (X_{1\sigma} + cX_{2\sigma}')^2}} \\ &= \frac{220}{\sqrt{(0.228 + 1.024 \times 0.224)^2 + (0.44 + 1.024 \times 0.6)^2}} \text{ A} \\ &= 191.47 \text{ A} \end{aligned}$$

(8) 电磁转矩  $T_e$ 。

① 电磁功率

$$\begin{aligned} P_e &= P_2 + p_{\Delta} + p_{\text{on}} + p_{\text{Cu2}} = (17059.1 + 85 + 250 + 605.20) \text{ W} \\ &= 17999.3 \text{ W} \end{aligned}$$

② 电磁转矩

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{17999.3}{157} \text{ N} \cdot \text{m} = 114.65 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**5-22** 为什么绕线型感应电动机的转子中串入启动电阻后,启动电流减小而启动转矩反而增大?若串入电抗,是否会有同样的效果?

**答** 由感应电动机的启动电流  $I_{st}$  和启动转矩  $T_{st}$  的表达式(见习题 5-16)可知,增大转子电阻  $R_2$  或转子漏电抗  $X_{2\sigma}$  均会使电动机的启动电流减小,即转子中串入电阻或电抗都可以减小启动电流。

由感应电动机转子电阻变化时的  $T_e-s$  曲线(见图 5-4)可知,当感应电动机的临界转差率  $s_m < 1$  时,增大转子电阻  $R_2$ ,可以使电动机的启动转矩增大。但是,从启动转矩的表达式可知,由于转子漏电抗  $X_{2\sigma}$  在其分母位置,所以增大转子漏电抗只能使启动转矩  $T_{st}$  减小,无论如何也不能使启动转矩增大。

因此,在绕线型感应电动机中串入电阻与串入电抗不会有同样的

效果。

**5-23** 深槽型和双笼型感应电动机为什么具有较好的启动性能?

**答** 深槽型和双笼型感应电动机是利用转子导条电流的“集肤效应”,使转子电阻随运行情况自动变化,从而在保持工作性能基本不变的情况下,改善电动机的启动性能。转子导条电流的频率越高,集肤效应越显著。

深槽型感应电动机的转子槽形窄而深,为增大集肤效应,槽深  $h$  与槽宽  $b$  之比  $\frac{h}{b}$  取  $10 \sim 12$ 。启动时,转子电流的频率较高( $f_2 = f_1$ ),集肤效应显著,电流集中到导条上部,相当于导条的有效截面积减小,使转子的有效电阻增大,好像在转子回路中串入了一个启动电阻,因此,会减小启动电流,增大启动转矩;当电动机转入正常运行时,转子电流频率变得很低,仅  $1 \sim 3 \text{ Hz}$ ,集肤效应基本消失,于是转子导条中的电流又均匀分布,转子导条电阻又自动减小,电动机的工作特性将接近于一般的笼型转子电动机。

双笼型感应电动机的转子上有两套笼型绕组,分别称为上笼和下笼,上笼通常由电阻率较高的材料制成,电阻较大,下笼的导条截面积较大,且常用电阻率较低的材料制成,电阻较小。启动时,转子电流的频率较高,集肤效应显著,电流主要从上笼流过,因此,启动时上笼起主要作用,由于上笼的电阻较大,可以产生较大的启动转矩;正常运行时,转子电流频率很低,集肤效应基本上消失,上、下笼之间电流的分配基本上取决于它们的电阻,转子电流大部分从电阻较小的下笼流过,产生正常运行时的电磁转矩。

**5-24** 有一台三相绕线型感应电动机,  $P_N = 155 \text{ kW}$ ,  $n_N = 1450 \text{ r/min}$ ,  $U_{1N} = 380 \text{ V}$ , 定、转子均为 Y 联结,  $\cos\varphi_N = 0.89$ ,  $\eta_N = 0.89$ , 参数  $R_1 = R'_2 = 0.012 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 0.06 \Omega$ ,  $k_e = k_i = 1.73$ , 励磁电流略去不计。现要把该机的启动电流限制在  $1.5 I_{1N}$ , 试计算启动电阻的值以及启动转矩倍数。

**解** (1) 启动电阻  $R_{st}$ 。

① 定子额定电流

$$I_{1N} = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_{1N} \cos\varphi_N \eta_N} = \frac{155 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.89 \times 0.89} \text{ A} = 297.32 \text{ A}$$

因为 Y 联结, 则有

$$U_{1N\Phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 380 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

$$I_{1N\Phi} = I_{1N} = 297.32 \text{ A}$$

② 启动电阻  $R_{st}$ 。

忽略励磁电抗, 取修正系数  $c = 1.0$ , 根据题意有

$$I_{st} = \frac{U_{1N\Phi}}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_{st})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} = 1.5 I_{1N\Phi}$$

$$= 1.5 \times 297.32 \text{ A}$$

$$I_{st} = \frac{220}{\sqrt{(0.012 + 0.012 + R'_{st})^2 + (0.06 + 0.06)^2}} \text{ A}$$

解得

$$R'_{st} = 0.4545 \Omega$$

$$R_{st} = \frac{R'_{st}}{k_e k_i} = \frac{0.4545}{1.73 \times 1.73} \Omega = 0.152 \Omega$$

(2) 启动转矩倍数  $T_{st}/T_N$ 。

① 同步转速

$$n_s = 3000 \text{ r/min} \quad (p = 1)$$

$$n_s = 1500 \text{ r/min} \quad (p = 2)$$

根据普通三相感应电动机  $s_N$  取  $0.02 \sim 0.05$ , 可以判定该电动机极对数  $p = 2$ , 同步转速  $n_s = 1500 \text{ r/min}$ 。

② 同步角速度

$$\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi \times 1500}{60} \text{ rad/s} = 157 \text{ rad/s}$$

③ 额定角速度

$$\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = \frac{2\pi \times 1450}{60} \text{ rad/s} = 151.77 \text{ rad/s}$$

④ 额定转矩

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{155 \times 10^3}{151.77} \text{ N} \cdot \text{m} = 1021.28 \text{ N} \cdot \text{m}$$

⑤ 启动转矩

$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1N\Phi}^2 (R'_2 + R'_{st})}{(R_1 + R'_2 + R'_{st})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}$$

$$= \frac{3}{157} \times \frac{220^2 \times (0.012 + 0.4545)}{(0.012 + 0.012 + 0.4545)^2 + (0.06 + 0.06)^2} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$= 1772.84 \text{ N} \cdot \text{m}$$

## ⑥ 启动转矩倍数

$$T_{st}/T_N = \frac{1772.84}{1021.28} = 1.736$$

## 5-25 习题 5-14 的三相笼型电动机, 试求:

(1) 定子改成 Y 联结时, 电动机的各参数值 (包括  $R_1$ 、 $R'_2$ 、 $X_{1\sigma}$ 、 $X'_{2\sigma}$ 、 $R_m$  和  $X_m$ );

(2) 电动机在  $\Delta$  联结、 $U_{1N}$  为 380 V 时的启动电流  $I_{st(\Delta)}$  和启动转矩  $T_{st(\Delta)}$ ;

(3) 电动机在 Y 联结、 $U_{1N}$  为 380 V 时的启动电流  $I_{st(Y)}$  和启动转矩  $T_{st(Y)}$ 。

解 (1) 改成 Y 联结时, 电动机的各参数值。

因为三相感应电动机的等效电路中的参数是一相绕组的参数, 所以三相感应电动机的定子绕组由  $\Delta$  联结改成 Y 联结后, 各相绕组中的参数不变。因此, 用等效电路进行分析计算时, 电动机的各参数值均相同。

(2)  $\Delta$  联结时的启动电流  $I_{st(\Delta)}$  和启动转矩  $T_{st(\Delta)}$ 。

## ① 修正系数

$$c \approx 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m} = 1 + \frac{1.74}{75} = 1.0232$$

② 启动电流  $I_{st(\Delta)}$ 。

$\Delta$  联结, 则有

$$U_{1N\Delta} = U_{1N} = 380 \text{ V}$$

$$I_{st(\Delta)\Delta} = \frac{U_{1N\Delta}}{\sqrt{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_1 + cX'_{2\sigma})^2}}$$

$$= \frac{380^2}{\sqrt{(0.715 + 1.0232 \times 0.416)^2 + (1.74 + 1.0232 \times 3.03)^2}} \text{ A}$$

$$= 76.414 \text{ A}$$

$$I_{st(\Delta)} = \sqrt{3} I_{st(\Delta)\Delta} = \sqrt{3} \times 76.414 \text{ A} = 132.35 \text{ A}$$

## ③ 同步角速度

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi \times 50}{2} \text{ rad/s} = 157 \text{ rad/s}$$

## ④ 启动转矩

$$\begin{aligned} T_{st(\Delta)} &= \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1N\phi}^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} \\ &= \frac{3}{157} \times \frac{380^2 \times 0.416}{(0.715 + 1.0232 \times 0.416)^2 + (1.74 + 1.0232 \times 3.03)^2} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 46.416 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

(3) Y 联结时的启动电流  $I_{st(Y)}$  和启动转矩  $T_{st(Y)}$ 。

① 启动电流  $I_{st(Y)}$ 。

Y 联结, 则有

$$\begin{aligned} U_{1N\phi} &= \frac{1}{\sqrt{3}} U_{1N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 380 \text{ V} = 220 \text{ V} \\ I_{st(Y)\phi} &= \frac{U_{1N\phi}}{\sqrt{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}} \\ &= \frac{220}{\sqrt{(0.715 + 1.0232 \times 0.416)^2 + (1.74 + 1.0232 \times 3.03)^2}} \text{ A} \\ &= 44.24 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_{st(Y)} = I_{st(Y)\phi} = 44.24 \text{ A}$$

## ② 启动转矩

$$\begin{aligned} T_{st(Y)} &= \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1N\phi}^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} \\ &= \frac{3}{157} \times \frac{220^2 \times 0.416}{(0.715 + 1.0232 \times 0.416)^2 + (1.74 + 1.0232 \times 3.03)^2} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 15.558 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

**5-26** 试述极对数为 2:1 的双速感应电动机的变极原理。

**答** 下面以最简单的 2/4 极单绕组双速电动机为例来说明。

图 5-6 和图 5-7 所示为同一台单绕组双速变极调速三相感应电动机的定子绕组中一相绕组的简图, 图中只画出 A 相绕组, 它包含两组线圈(或两个极相组)  $A_1X_1$  和  $A_2X_2$ , 每组线圈用一个集中线圈来表示。在图 5-6(b) 和图 5-7(b) 的展开图中的  $\otimes$  和  $\odot$  表示每个线圈边所产生的磁场方向( $\otimes$  表示磁力线进入纸面,  $\odot$  表示磁力线穿出纸面)。在图 5-6 中,

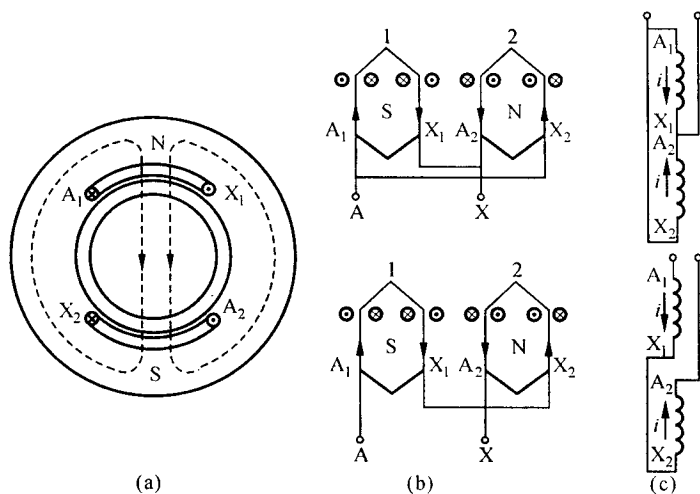


图 5-6  $2p = 2$  时一相绕组的联结

(a) 绕组布置及其磁场图; (b) 展开图; (c) 接线图

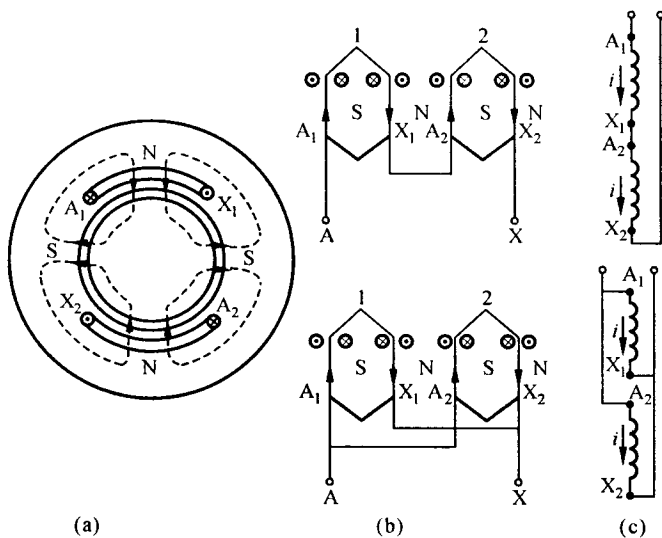


图 5-7  $2p = 4$  时一相绕组的联结

(a) 绕组布置及其磁场图; (b) 展开图; (c) 接线图



两组线圈反向并联或反向串联时,在电机的气隙中,可以形成2极磁场。如果将两组线圈正向串联(又称庶极接法)或正向并联,如图5-7所示,其中一组线圈  $A_2X_2$  中的电流改变了方向,在电动机的气隙中,则可形成4极磁场,即定子绕组的极对数增加了一倍。由此可见,在倍极比单绕组双速电动机中,通常以少数极作为基本极( $60^\circ$  相带绕组),如欲使磁极数倍增,应变换定子绕组的接线,使相邻线圈组的电流反向。

**5-27** 试分析绕线型感应电动机的转子中串入调速电阻、负载为恒转矩负载时,电动机内部发生的物理过程。调速前、后转子电流是否改变?为什么?

答 绕线型感应电动机转子回路串电阻调速的物理过程如下。

在调速电阻  $R_n$  接入的最初瞬间,因转子有惯性,其转速未变,转子感应电动势也未变,转子电流却因转子电路阻抗增加而减小。由于主磁通未变,所以电动机的电磁转矩减小。于是,电磁转矩  $T_e$  小于总负载转矩( $T_2 + T_0$ ),电动机的转速开始下降(转差率  $s$  增加),而转子的感应电动势开始增加,又引起转子电流增加,电磁转矩也开始增加。这个过程一直进行到电磁转矩  $T_e$  重新和总负载转矩( $T_2 + T_0$ ) 互相平衡为止,这时电动机在一个较低转速下稳定运行。

当转子回路串入调速电阻  $R_n$  时,感应电动机的  $T_e-s$  曲线由曲线1变为曲线2,其最大值向左移动,如图5-8所示。若总负载转矩( $T_2 + T_0$ ) 保持不变,则电动机的运行点将从  $a$  点变到  $b$  点,相应地转差率从  $s_1$  增加到  $s_2$ ,转速则从  $(1-s_1)n_s$  降到  $(1-s_2)n_s$ 。调速电阻  $R_n$  愈大,  $T_e-s$  曲线愈向左移,转速便愈下降。

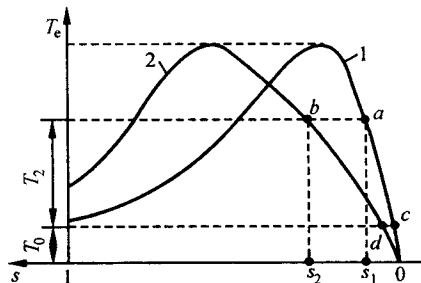


图 5-8 转子回路串电阻调速

此外,在恒转矩调速时,  $T_e = T_2 + T_0 = \text{常数}$ , 从电磁转矩  $T_e$  的表达式可知, 若参数  $R_1$ 、 $X_{1\sigma}$  和  $X'_{2\sigma}$  皆不变, 欲保持  $T_e$  不变, 则应有  $\frac{R'_2 + R'_0}{s_2} = \frac{R'_2}{s_1} = \text{常数}$ 。于是, 根据等效电路可见: 恒转矩调速时, 定、转子电流皆不变, 而与转子回路中串入电阻的大小无关。

**5-28** 有一台三相四极的绕线型感应电动机, 额定转速  $n_N = 1485 \text{ r/min}$ , 转子每相电阻  $R_2 = 0.012 \Omega$ 。设负载转矩保持为额定值不变, 今欲把转速从  $1485 \text{ r/min}$  下调到  $1050 \text{ r/min}$ , 问转子每相应串入多大的调速电阻?

解 (1) 同步转速

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

(2) 额定转差率

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1500 - 1485}{1500} = 0.01$$

(3) 转速  $n = 1050 \text{ r/min}$  时的转差率

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1050}{1500} = 0.3$$

(4) 转速  $n = 1050 \text{ r/min}$  时应串入的调速电阻  $R_0$ 。

恒转矩调速时, 有

$$\frac{R'_2}{s_N} = \frac{R'_2 + R'_0}{s}$$

同理

$$\frac{R_2}{s_N} = \frac{R_2 + R_0}{s}$$

即

$$\frac{0.012}{0.01} = \frac{0.012 + R_0}{0.3}$$

解得

$$R_0 = 0.348 \Omega$$

**5-29** 有一台三相、定子为 Y 联结的感应电动机, 启动时发现有一相断线, 问电动机投入电网后能否启动起来? 如果在运行时发生一相断线, 问定子电流、转速和最大转矩有何变化, 断线后电动机能否继续长期带上额定负载?

**答** 对于Y联结的三相感应电动机,若启动前有一相断线,则电动机投入电网后,电动机的气隙中将产生脉振磁场,电动机的启动转矩为零。因此,电动机不能启动起来。

如果Y联结的三相感应电动机运行时有一相断线,则电动机将变成缺相运行(又称“单相运行”),电动机不会停下来。但是电动机的最大转矩将会变小,导致电动机的转速降低、定子电流急剧增大。因此,电动机不能再继续长期带上额定负载运行。

### 5-30 怎样改变单相电容电动机的转向?

**答** 电动机的转向取决于旋转磁场的转向。单相电容电动机是将电容器接入一相绕组,使该相绕组的电流超前于未接入电容器的相绕组的电流一个相位角,气隙中就会形成一个旋转磁场,其方向为从超前电流相绕组的轴线转向滞后电流相绕组的轴线。需要改变单相电容电动机的转向时,可以采用以下方法。

(1) 仅改变其中一相绕组的接线,即将启动绕组(或工作绕组)的两根引出线对调后再接入电网。

(2) 如果两相绕组是对称的,即两相绕组的导线截面积、匝数、节距均相同,则可将电容器接入另一相。

**5-31** 有一台 110 V、50 Hz 的 4 极单相感应电动机,其参数为  $R_1 = R'_2 = 2 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 2 \Omega$ ,  $X_m = 50 \Omega$ ,  $R_m = 4.5 \Omega$ , 机械损耗和杂散损耗两项之和为 10 W。当转差率  $s = 0.05$  时,试求电动机的:

- (1) 定子电流和功率因数;
- (2) 电磁转矩和输出功率;
- (3) 正向和反向旋转磁场幅值之比。

**解** (1) 定子电流  $I_1$  和功率因数  $\cos\varphi_1$ 。

① 定子阻抗

$$Z_{1\sigma} = R_1 + jX_{1\sigma} = (2 + j2) \Omega$$

② 与正转和反转磁场相应的励磁阻抗

$$\begin{aligned} 0.5Z_m &= 0.5(R_m + jX_m) = 0.5 \times (4.5 + j50) \Omega \\ &= (2.25 + j25) \Omega = 25.101 \angle 84.86^\circ \Omega \end{aligned}$$

③ 转子正向阻抗

$$Z'_{2\sigma(s)} = 0.5 \frac{R'_2}{s} + j0.5X'_{2\sigma} = \left( 0.5 \times \frac{2}{0.05} + j0.5 \times 2 \right) \Omega$$

$$= (20 + j1) \Omega = 20.025 \angle 2.86^\circ \Omega$$

## ④ 转子反向阻抗

$$\begin{aligned} Z'_{2s(2-s)} &= 0.5 \frac{R'_2}{2-s} + j0.5 X'_{2s} = \left( 0.5 \times \frac{2}{2-0.05} + j0.5 \times 2 \right) \Omega \\ &= (0.5128 + j1) \Omega = 1.124 \angle 62.85^\circ \Omega \end{aligned}$$

⑤  $0.5Z_m$  与  $Z'_{2s(s)}$  的并联值

$$\begin{aligned} Z_t &= \frac{0.5Z_m Z'_{2s(s)}}{0.5Z_m + Z'_{2s(s)}} = \frac{25.101 \angle 84.86^\circ \times 20.025 \angle 2.86^\circ}{2.25 + j25 + 20 + j1} \Omega \\ &= \frac{25.101 \angle 84.86^\circ \times 20.025 \angle 2.86^\circ}{34.221 \angle 49.44^\circ} \Omega = 14.688 \angle 38.28^\circ \Omega \\ &= (11.530 + j9.099) \Omega \end{aligned}$$

⑥  $0.5Z_m$  与  $Z'_{2s(2-s)}$  的并联值

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{0.5Z_m Z'_{2s(2-s)}}{0.5Z_m + Z'_{2s(2-s)}} = \frac{25.101 \angle 84.86^\circ \times 1.124 \angle 62.85^\circ}{2.25 + j25 + 0.5128 + j1} \Omega \\ &= \frac{25.101 \angle 84.86^\circ \times 1.124 \angle 62.85^\circ}{26.146 \angle 83.93^\circ} \Omega = 1.079 \angle 63.78^\circ \Omega \\ &= (0.4767 + j0.9680) \Omega \end{aligned}$$

## ⑦ 定子电流

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U_1 \angle 0^\circ}{Z_{1s} + Z_t + Z_b} \\ &= \frac{110 \angle 0^\circ}{2 + j2 + 11.530 + j9.099 + 0.4767 + j0.9680} \text{ A} \\ &= \frac{110 \angle 0^\circ}{14.007 + j12.067} \text{ A} = \frac{110 \angle 0^\circ}{18.488 \angle 40.74^\circ} \text{ A} \\ &= 5.95 \angle -40.74^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

## ⑧ 功率因数

$$\cos \varphi_1 = \cos 40.74^\circ = 0.758$$

(2) 电磁转矩  $T_e$  和输出功率  $P_2$ 。

## ① 转子正向电流

$$\begin{aligned} I'_{2f} &= I_1 \frac{Z_t}{Z'_{2s(s)}} = 5.95 \angle -40.74^\circ \times \frac{14.688 \angle 38.28^\circ}{20.025 \angle 2.86^\circ} \text{ A} \\ &= 4.364 \angle -5.32^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

## ② 转子反向电流

$$\begin{aligned} I'_{2b} &= I_1 \frac{Z_b}{Z'_{2\sigma(2-s)}} = 5.95 \angle -40.74^\circ \times \frac{1.079 \angle 63.78^\circ}{1.124 \angle 62.85^\circ} \text{ A} \\ &= 5.712 \angle -39.81^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

## ③ 同步角速度

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi \times 50}{2} \text{ rad/s} = 157 \text{ rad/s}$$

## ④ 电磁转矩

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{1}{\Omega_s} \left( I_{2f}'^2 \frac{0.5R_2'}{s} - I_{2b}'^2 \frac{0.5R_2'}{2-s} \right) \\ &= \frac{1}{157} \times \left( 4.364^2 \times \frac{0.5 \times 2}{0.05} - 5.712^2 \times \frac{0.5 \times 2}{2-0.05} \right) \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 2.319 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

## ⑤ 电磁功率

$$P_e = T_e \Omega_s = 2.319 \times 157 \text{ W} = 364.158 \text{ W}$$

## ⑥ 转子铜耗

$$\begin{aligned} p_{\text{Cu2}} &= I_{2f}'^2 \times 0.5R_2' + I_{2b}'^2 \times 0.5R_2' \\ &= (4.364^2 \times 0.5 \times 2 + 5.712^2 \times 0.5 \times 2) \text{ W} \\ &= 51.671 \text{ W} \end{aligned}$$

## ⑦ 输出功率

$$\begin{aligned} P_2 &= P_e - p_{\text{Cu2}} - (p_n + p_\Delta) = (364.158 - 51.671 - 10) \text{ W} \\ &= 302.49 \text{ W} \end{aligned}$$

(3) 正向和反向旋转磁场之比  $E_f/E_b$ 。

$$\begin{aligned} \dot{E}_f &= \dot{I}_{2f}' Z'_{2\sigma(s)} = 4.364 \angle -5.32^\circ \times 20.025 \angle 2.86^\circ \text{ V} \\ &= 87.389 \angle -2.46^\circ \text{ V} \\ \dot{E}_b &= \dot{I}_{2b}' Z'_{2\sigma(2-s)} = 5.712 \angle -39.81^\circ \times 1.124 \angle 62.85^\circ \text{ V} \\ &= 6.420 \angle 23.04^\circ \text{ V} \\ E_f/E_b &= \frac{87.389}{6.420} = 13.61 \end{aligned}$$

**5-32** 有一台 30 kW、50 Hz、380 V ( $\Delta$  联结) 的三相感应电机, 其参数为  $R_1 = 0.254 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = 0.783 \Omega$ ,  $R_2' = 0.198 \Omega$ ,  $X_{2\sigma}' = 1.146 \Omega$ ,  $R_m = 1.55 \Omega$ ,  $X_m = 32.6 \Omega$ , 机械损耗  $p_n = 450 \text{ W}$ , 杂散损耗与输出功率的平方成正比, 额定负载时杂散损耗  $p_\Delta = 500 \text{ W}$ 。现将该电机由原动机

拖动,接到 380 V 的电网上作为发电机运行。当转差率  $s = -0.016$  时,试求该电机的:

(1) 定子相电流  $I_{1\phi}$  和发出的电功率  $P_2$ ;

(2) 输入的机械功率  $P_1$ ;

(3) 效率  $\eta$ 。

解 用 T 形等效电路计算。

(1) 定子相电流  $I_{1\phi}$  和发出的电功率  $P_2$ 。

① 转子阻抗

$$\begin{aligned} Z'_{2s} &= \frac{R'_2}{s} + jX'_{2s} = \left( \frac{0.198}{-0.016} + j1.146 \right) \Omega \\ &= (-12.375 + j1.146) \Omega = 12.428 \angle 174.71^\circ \Omega \end{aligned}$$

② 励磁阻抗

$$Z_m = R_m + jX_m = (1.55 + j32.6) \Omega = 32.637 \angle 87.28^\circ \Omega$$

③  $Z'_{2s}$  与  $Z_m$  的并联值

$$\begin{aligned} Z'_{2s} // Z_m &= \frac{Z'_{2s} Z_m}{Z'_{2s} + Z_m} = \frac{12.428 \angle 174.71^\circ \times 32.637 \angle 87.28^\circ}{-12.375 + j1.146 + 1.55 + j32.6} \Omega \\ &= \frac{12.428 \angle 174.71^\circ \times 32.637 \angle 87.28^\circ}{35.44 \angle 107.78^\circ} \Omega \\ &= 11.445 \angle 154.21^\circ \Omega = (-10.305 + j4.979) \Omega \end{aligned}$$

④ 定子相电流。

△ 联结,则有

$$U_{1N\phi} = U_{1N} = 380 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} I_{1\phi} &= \frac{U_{1N\phi}}{Z_1 + Z'_{2s} // Z_m} = \frac{380 \angle 0^\circ}{0.254 + j0.783 - 10.305 + j4.979} \text{ A} \\ &= \frac{380 \angle 0^\circ}{11.585 \angle 150.18^\circ} \text{ A} = 32.80 \angle -150.18^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

⑤ 向电网输出的有功功率  $P_2$ 。

从电网吸收的有功功率

$$\begin{aligned} P_1 &= 3U_{1N\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 = 3 \times 380 \times 32.80 \times \cos(150.18^\circ) \text{ W} \\ &= -32441 \text{ W} = -32.441 \text{ kW} \end{aligned}$$

功率为负值,表示实际上是向电网输出有功功率,即  $P_2 = 32.441 \text{ kW}$ 。

(2) 输入的机械功率  $P_1$ 。

① 转子相电流

$$I'_{2\phi} = I_{1\phi} \left| \frac{Z_m}{Z'_{2\phi} + Z_m} \right| = 32.80 \times \frac{32.637}{35.44} \text{ A} = 30.206 \text{ A}$$

② 励磁电流

$$I_{m\phi} = I_{1\phi} \left| \frac{Z'_{2\phi}}{Z'_{2\phi} + Z_m} \right| = 32.80 \times \frac{12.428}{35.44} \text{ A} = 11.502 \text{ A}$$

③ 定子铜耗

$$p_{\text{Cu1}} = 3I_{1\phi}^2 R_1 = 3 \times 32.80^2 \times 0.254 \text{ W} = 819.79 \text{ W}$$

④ 转子铜耗

$$p_{\text{Cu2}} = 3I_{2\phi}'^2 R_2' = 3 \times 30.206^2 \times 0.198 \text{ W} = 541.97 \text{ W}$$

⑤ 铁耗

$$p_{\text{Fe}} = 3I_{m\phi}^2 R_m = 3 \times 11.502^2 \times 1.55 \text{ W} = 615.18 \text{ W}$$

⑥ 杂散损耗

$$p_{\Delta} = \frac{P_2^2}{P_N^2} \times 500 = \frac{32.441^2}{30^2} \times 500 \text{ W} = 584.64 \text{ W}$$

⑦ 输入的机械功率

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 + p_{\text{Cu1}} + p_{\text{Cu2}} + p_{\text{Fe}} + p_{\Delta} + p_{\Delta} \\ &= (32441 + 819.79 + 541.97 + 615.18 + 450 + 584.64) \text{ W} \\ &= 35452.58 \text{ W} = 35.453 \text{ kW} \end{aligned}$$

(3) 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{32.441}{35.453} \times 100\% = 91.5\%$$

**5-33** 有一台用做地面运输用的直线感应电动机, 定子为铺设在地上展成平面的鼠笼轨道, 动子(又称滑子)为装有 20 极、极距为 20cm 的展开式三相绕组的小车。设动子由 50 Hz 的电源通过滑动接触供电, 试求:

(1) 同步线速度  $v_s$  (km/h);

(2) 若转差率为 4%, 试求定子内感应电流的频率  $f_2$  和动子的运行速度  $v$ ;

(3) 如果要使动子的运行速度超过 75 km/h, 有何方法?

(4) 如果改变动子的运行方向, 有何方法?

解 (1) 同步线速度  $v_s$ 。

① 同步转速

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{10} \text{ r/min} = 300 \text{ r/min}$$

② 同步线速度

$$v_s = 2\pi r n_s = 20 \times 20 \times 300 \text{ cm/min} = 120000 \text{ cm/min} = 72 \text{ km/h}$$

(2) 定子内感应电流的频率  $f_2$  和动子的运行速度  $v$ 。

① 定子内感应电流的频率

$$f_2 = sf_1 = 0.04 \times 50 \text{ Hz} = 2 \text{ Hz}$$

② 动子的运行速度

$$v = (1-s)v_s = (1-0.04) \times 72 \text{ km/h} = 69.12 \text{ km/h}$$

(3) 提高电源的频率, 可以使动子的运行速度超过 75 km/h。

(4) 改变电源的相序(即对调三相电源中任意两根电源线与电动机的接线位置), 可以改变动子的运行方向。

## 5.3 经典题型

1. 为什么三相感应电动机当定子绕组加额定电压, 而转子不转且转子绕组开路时, 定子电流约为额定电流的 20% ~ 50%。但是, 当转子绕组短路并堵转后, 定、转子绕组中电流却很大, 约为额定电流的 4 ~ 7 倍。

答 当三相感应电动机转子不转且转子绕组开路时, 对应的等效电路如图 5-9(a) 所示。这时定子绕组中流过的电流是励磁电流。在定子

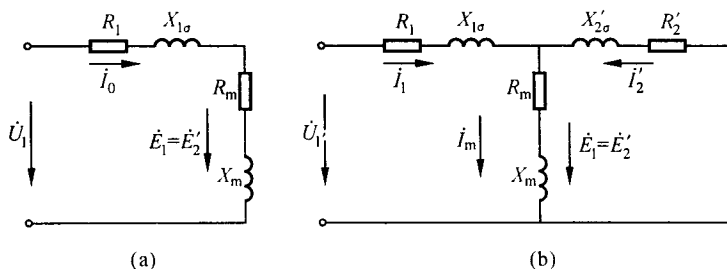


图 5-9 三相感应电动机的等效电路

(a) 转子不转且转子绕组开路时;

(b) 转子绕组短路并堵转时



绕组加额定电压  $U_{1N}$  情况下, 定子电流  $I_0$  的大小取决于定子漏阻抗  $Z_{l_0}$  和励磁阻抗  $Z_m$  的大小。由于励磁阻抗  $Z_m$  比较大, 所以一般三相感应电动机的励磁电流为额定电流的  $20\% \sim 50\%$ 。

当转子绕组短路并堵转时, 对应的等效电路如图 5-9(b) 所示。由于转子漏阻抗归算值  $Z'_{20}$  较励磁阻抗  $Z_m$  的值小得多, 小阻抗与大阻抗并联, 小阻抗起主要作用。因此, 转子绕组短路并堵转时, 定、转子电流就较大, 一般为额定电流的  $4 \sim 7$  倍。

2. 当三相感应电机定子绕组接在频率为  $50\text{ Hz}$  的电源上作电动机运行时, 定子电流的频率为多少? 定子绕组感应电动势的频率是多少? 转子绕组感应电动势的频率是多少? 转子电流的频率是多少? 由定子电流产生的基波旋转磁动势相对于定子的转速是多少? 相对于转子的转速又是多少? 由转子电流产生的基波旋转磁动势相对于转子的转速是多少? 相对于定子的转速又是多少?

答 当三相感应电机定子绕组接在  $50\text{ Hz}$  的电源上作电动机运行时: 定子电流的频率为  $50\text{ Hz}$ ; 定子绕组感应电动势的频率为  $50\text{ Hz}$ ; 转子绕组感应电动势的频率为  $50s\text{ Hz}$  ( $s$  是转差率); 由定子电流产生的基波旋转磁动势相对于定子的转速为同步转速  $n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{p} = \frac{3000}{p} (\text{r/min})$  ( $p$  是电机的极对数), 其相对于转子的转速为  $n_s - n = sn_s (\text{r/min})$ ; 由转子电流产生的基波旋转磁动势相对于转子的转速为  $n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60 \times sf_1}{p} = \frac{60 \times s \times 50}{p} = \frac{3000s}{p} = sn_s (\text{r/min})$ , 其相对于定子的转速为  $n + n_2 = n + (n_s - n) = n_s$ 。

3. 三相绕线转子感应电动机, 定、转子端点接于同一电源, 接线如图 5-10 所示。问此时转子的转速为多少? 转向如何? 若带上负载, 其转速是否会随负载的增加而降低?

答 定、转子端点接于同一交流电源, 当电流的相序为 A—B—C—A 时, 定子侧将产生逆时针方向的旋转磁场, 其转速为同步转速  $n_s$ 。转子侧产生的旋转磁场相对于转子是顺时针方向, 转速为同步转速  $n_s$ 。所以, 转子必须以  $2n_s$  的转速逆时针方向旋转, 才能保证定、转子侧的旋转磁场相对静止, 电动机才能正常运行。

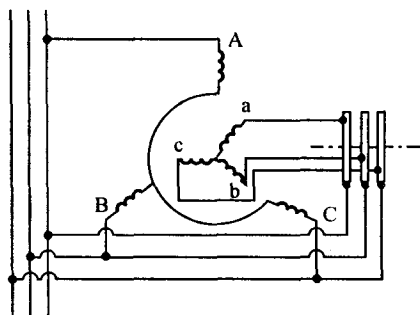


图 5-10 绕线转子感应电动机接线图

电动机带负载运行时,转子的转速仍为  $2n_s$ ,并且转速不随负载的增加而降低,否则电动机不能正常运行。但这种双馈运行方向过载能力甚低,易于失步。

4. 一台绕线转子三相感应电动机,拖动一台负载转矩与速度的平方成正比的机械负载。现采用在转子回路中串电阻调速。若忽略空载转矩,试证明转子回路中的电阻损耗在转差率  $s = \frac{1}{3}$  时为最大。

证 由给定条件可知,忽略空载转矩后,则电动机的负载转矩  $T_L$  与电动机的电磁转矩  $T_e$  相等,即

$$T_e = T_L = K_1 n^2$$

电动机的电磁功率  $P_e = T_e \Omega_s = K_2 n^2$  (其中  $\Omega_s$  为电动机的同步角速度)

电动机转子铜耗

$$\begin{aligned} p_{Cu2} &= P_e s = K_2 n^2 s = K_2 [n_s(1-s)]^2 s \\ &= K_3 (s^3 - 2s^2 + s) \end{aligned}$$

求转子铜耗最大值,令  $\frac{dp_{Cu2}}{ds} = 0$  得  $3s^2 - 4s + 1 = 0$ ,解得  $s_1 = \frac{1}{3}$ ,

$s_2 = 1$ ,后者转速为零,无功率输出,舍去。所以,在  $s = \frac{1}{3}$  所对应的转速下运行时,转子铜耗达到最大值。证毕。

5. 简要论述试验测定三相感应电动机的励磁参数  $R_m$ 、 $X_m$ 、 $Z_m$ 、铁

耗  $p_{Fe}$ 、机械损耗  $p_n$  和定、转子参数  $R_1$ 、 $R'_2$ 、 $X_{1\sigma}$ 、 $X'_{2\sigma}$  的方法 (设  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$ )。如何用上述参数求出电动机的下列运行数据:

- (1) 定、转子电流  $I_1$ 、 $I'_2$  (设转差率  $s$  已给定);
- (2) 上述运行情况下的电磁转矩、效率和功率因数;
- (3) 启动电流和启动转矩。

答  $R_m$ 、 $X_m$ 、 $Z_m$  可以通过电动机的空载试验测定,即在定子绕组上施加额定电压和额定频率的电源,转轴上不带负载,测出定子相电压  $U_{1\phi}$ 、定子相电流  $I_{0\phi}$  和三相空载功率  $P_0$ ,则空载阻抗  $Z_0 = Z_1 + Z_m = \frac{U_{1\phi}}{I_{0\phi}}$ 。由于一般  $Z_1 \ll Z_m$ ,故  $Z_m \approx Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{0\phi}}$ 。

由于空载时的功率  $P_0 = m_1 I_{0\phi}^2 R_1 + p_{Fe} + p_n + p_\Delta$ ,应将铁耗从  $P_0$  中分离。为此,设  $P'_0 = p_{Fe} + p_n + p_\Delta = P_0 - m_1 I_{0\phi}^2 R_1$ ,并画出  $P'_0 = f(U_{1\phi}^2)$  曲线。曲线中与电压大小无关的分量即为  $p_n + p_\Delta$ ,与电压  $U_{1\phi}^2$  近似成正比的分量为铁耗  $p_{Fe}$ ,因此可将额定电压下的铁耗  $p_{Fe}$  求出,

$$\text{则 } R_m = \frac{p_{Fe}}{m_1 I_{0\phi}^2}。$$

通过短路(堵转)试验,可以测出短路相电压  $U_{K\phi}$ 、短路相电流  $I_{K\phi}$  和三相短路功率  $P_K$ ,则短路阻抗  $Z_K = \frac{U_{K\phi}}{I_{K\phi}}$ ,短路电阻  $R_K = \frac{P_K}{m_1 I_{K\phi}^2}$ 。若假定  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$ ,则  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{1}{2} X_K$ ,然后用电桥测定电动机定子绕组的相电阻  $R_1$ ,则  $R'_2 = R_K - R_1$ 。

(1) 在给定转差率  $s$  以后,可利用上述求出的参数,根据等效电路计算出定、转子电流  $I_1$ 、 $I'_2$ 。

已知  $Z_{1\sigma} = R_1 + jX_{1\sigma}$ ,  $Z_m = R_m + jX_m$ ,  $Z'_{2\sigma} = R'_2 + jX'_{2\sigma} + \frac{1-s}{s} R'_2 = \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma}$ ,可求出

$$\text{总阻抗 } Z = Z_{1\sigma} + \frac{Z_m Z'_{2\sigma}}{Z_m + Z'_{2\sigma}}$$

$$\text{定子电流 } I_{1\phi} = \frac{\dot{U}_{1\phi}}{Z}$$

$$\text{转子电流 } I'_{2\phi} = I_{1\phi} \frac{Z_m}{Z_m + Z'_{2\sigma}}$$

(2) 电磁转矩、效率和功率因数。

$$\text{电磁功率 } P_e = m_1 I_2' \frac{R_2'}{s}$$

$$\text{电磁转矩 } T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{60 P_e}{2\pi n_s}$$

$$\text{机械功率 } P_n = (1-s)P_e$$

$$\text{输出功率 } P_2 = P_n - p_n - p_\Delta$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p}$$

(3) 利用上述计算电流和转矩的计算公式,令  $s=1$ ,可以求得启动电流  $I_{st}$  和启动转矩  $T_{st}$ 。

6. 一台三相感应电动机,极数  $2p=2$ ,额定功率  $P_N=2000 \text{ kW}$ ,额定电压  $U_N=6000 \text{ V}$ ,定子槽数  $Q_1=48$ ,定子绕组采用双层叠绕组,Y联结,每极每相槽数  $q=8$ ,并联支路数  $a=2$ (即每极一条支路),基波节距因数  $k_{p1}=0.866$ ,基波分布因数  $k_{d1}=0.956$ 。今欲改接在  $3000 \text{ V}$  电压下运行,支路数  $a=4$ ,在每个极相组中有两种改接方案:

(1) 用 1、3、5、7 线圈串联为一条支路,用 2、4、6、8 线圈串联为另一条支路,然后并联;

(2) 用 1、4、5、8 线圈串联为一条支路,用 2、3、6、7 线圈串联为另一条支路,然后并联。

若忽略定子漏阻抗压降,试计算两种方案中并联支路间的电动势差各为多少?为得到较小的环流,上述哪个方案较好些?

解 Y 联结,则有

$$U_\phi = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \text{ V} = 3464.2 \text{ V}$$

$$\text{槽距电角 } \alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q_1} = \frac{1 \times 360^\circ}{48} = 7.5^\circ$$

因为  $2p=2, a=2$ ,忽略定子绕组漏阻抗压降,则

$$U_\phi = E_\phi = qk_{d1} E_{c1}$$

$$\text{线圈电动势 } E_{c1} = \frac{U_\phi}{qk_{d1}} = \frac{3464.2}{8 \times 0.956} \text{ V} = 452.96 \text{ V, 取 } E_{c1} \angle 0^\circ \text{ 为}$$

参考相量。

(1) 方案(1)。

$$\begin{aligned}
 \dot{E}'_{\phi 1} &= E_{c1} \angle 0^\circ + E_{c1} \angle -2\alpha + E_{c1} \angle -4\alpha + E_{c1} \angle -6\alpha \\
 &= E_{c1} \angle 0^\circ + E_{c1} \angle -15^\circ + E_{c1} \angle -30^\circ + E_{c1} \angle -45^\circ \\
 &= E_{c1} (1 + 0.966 - j0.259 + 0.866 - j0.5 + 0.707 - j0.707) \\
 &= E_{c1} (3.539 - j1.466) \\
 &= 1735 \angle -22.5^\circ \text{ V} \\
 \dot{E}''_{\phi 1} &= E_{c1} \angle -\alpha + E_{c1} \angle -3\alpha + E_{c1} \angle -5\alpha + E_{c1} \angle -7\alpha \\
 &= E_{c1} \angle -7.5^\circ + E_{c1} \angle -22.5^\circ + E_{c1} \angle -37.5^\circ + E_{c1} \angle -52.5^\circ \\
 &= E_{c1} (0.991 - j0.1305 + 0.924 - j0.3827 + 0.7934 - j0.609 \\
 &\quad + 0.609 - j0.7934) \\
 &= E_{c1} (3.3174 - j1.9156) = 1735 \angle -30^\circ \text{ V} \\
 \Delta \dot{E}_{\phi 1} &= \dot{E}'_{\phi 1} - \dot{E}''_{\phi 1} = 1735 \angle -22.5^\circ - 1735 \angle -30^\circ \\
 &= [(1603 - j664) - (1503 - j867.5)] \text{ V} \\
 &= (100 + j203.5) \text{ V} = 226.7 \angle 63.8^\circ \text{ V} \\
 \Delta E_{\phi 1} &= 226.7 \text{ V}
 \end{aligned}$$

(2) 方案(2)。

$$\begin{aligned}
 \dot{E}'_{\phi 2} &= E_{c1} \angle 0^\circ + E_{c1} \angle -3\alpha + E_{c1} \angle -4\alpha + E_{c1} \angle -7\alpha \\
 &= E_{c1} \angle 0^\circ + E_{c1} \angle -22.5^\circ + E_{c1} \angle -30^\circ + E_{c1} \angle -52.5^\circ \\
 &= E_{c1} (1 + 0.924 - j0.3827 + 0.866 - j0.5 + 0.609 - j0.7934) \\
 &= E_{c1} (3.399 - j1.6761) \\
 &= 1717 \angle -26.25^\circ \text{ V} \\
 \dot{E}''_{\phi 2} &= E_{c1} \angle -\alpha + E_{c1} \angle -2\alpha + E_{c1} \angle -5\alpha + E_{c1} \angle -6\alpha \\
 &= E_{c1} \angle -7.5^\circ + E_{c1} \angle -15^\circ + E_{c1} \angle -37.5^\circ + E_{c1} \angle -45^\circ \\
 &= E_{c1} (0.991 - j0.1305 + 0.966 - j0.259 + 0.7934 - j0.609 \\
 &\quad + 0.707 - j0.707) \\
 &= E_{c1} (3.4574 - j1.7055) \\
 &= 1746 \angle -26.25^\circ \text{ V} \\
 \Delta \dot{E}_{\phi 2} &= \dot{E}'_{\phi 2} - \dot{E}''_{\phi 2} = 1717 \angle -26.25^\circ - 1746 \angle -26.25^\circ \\
 &= [1539.9 - j759.4 - (1565.9 - j772.2)] \text{ V} \\
 &= (-26 + j12.8) \text{ V} = 29 \angle 153.7^\circ \text{ V} \\
 \Delta E_{\phi 2} &= 29 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$\Delta E_{\phi 2} < \Delta E_{\phi 1}$$

方案(2)较好。

7. 一台绕线转子三相感应电动机,极数  $2p = 6$ ,额定频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,额定功率  $P_N = 11 \text{ kW}$ ,定、转子绕组都是 Y 联结,定子额定电压  $U_{1N} = 380 \text{ V}$ ,空载电流  $I_0 = 22 \text{ A}$ ,转子开路电压  $U_{20} = 190 \text{ V}$ ,额定转速  $n_N = 960 \text{ r/min}$ 。已知定子电阻  $R_1 = 0.40 \Omega$ ,定子漏电抗  $X_{1\sigma} = 0.96 \Omega$ ,转子电阻  $R_2 = 0.11 \Omega$ ,转子不转时,转子漏电抗  $X_{2\sigma} = 0.26 \Omega$ 。今在此电动机转子滑环之间加  $190 \text{ V}$  三相对称电压,定子绕组短路。试求:

(1) 额定负载时的转差率  $s_N$ 。

(2) 画出从转子侧看进去的 T 形等效电路,并计算每个参数(注意,在励磁支路只计算励磁阻抗  $Z_m$  即可,不必分成  $R_m$ 、 $X_m$ )。

解 (1) 因为定子绕组加额定电压时转子的开路电压为  $190 \text{ V}$ ,额定转速  $n_N = 960 \text{ r/min}$ ,所以转子滑环之间加  $190 \text{ V}$  三相对称电压时,气隙磁场与定子加额定电压时的气隙磁场相同,定子绕组短路,若定子能够转动,则额定转速必为  $960 \text{ r/min}$ 。求得

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} \text{ r/min} = 1000 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04$$

(2) 从转子侧看进去(即归算到转子侧)的 T 形等效电路如图 5-11 所示,因绕线转子电动机定、转子绕组的相数相等,所以  $k_e = k_i = \frac{U_{1N}}{U_{20}} = \frac{380}{190} = 2$ 。

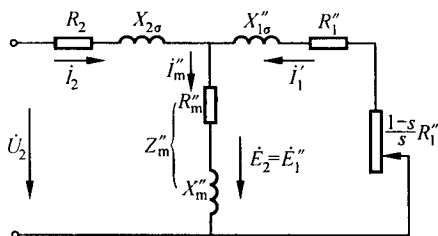


图 5-11 归算到转子侧的 T 形等效电路

把定子侧参数归算到转子侧:

$$R_1'' = \frac{R_1}{k_e k_i} = \frac{0.40}{2 \times 2} \Omega = 0.10 \Omega$$

$$X_{1\sigma}'' = \frac{X_{1\sigma}}{k_e k_i} = \frac{0.96}{2 \times 2} \Omega = 0.24 \Omega$$

因为定子为 Y 联结, 故有

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} \text{ V} = 220 \text{ V}$$

$$I_{0\phi} = I_0 = 22 \text{ A}$$

$$Z_0 = \frac{U_{1N\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{220}{22} \Omega = 10 \Omega$$

因为

$$Z_0 = Z_m + Z_{1\sigma}, Z_{1\sigma} \ll Z_m$$

所以, 可近似得到

$$Z_m = Z_0 = 10 \Omega$$

$$Z_m'' = \frac{Z_m}{k_e k_i} = \frac{10}{2 \times 2} \Omega = 2.5 \Omega$$

转子侧参数不变,  $R_2 = 0.11 \Omega$ ,  $X_{2\sigma} = 0.26 \Omega$ 。

8. 有一台绕线转子三相感应电动机, 定、转子绕组都是 Y 联结。当定子绕组加额定电压, 而转子绕组开路时, 滑环上的电压为 60 V。转子不动时, 转子绕组每相漏阻抗  $Z_{2\sigma} = R_2 + jX_{2\sigma} = (1.5 + j4.0) \Omega$ , 定子一相漏阻抗与转子一相漏阻抗的归算值相等, 即  $Z_{1\sigma} = Z'_{2\sigma}$ , 忽略励磁电流, 向转子绕组中串入一个 Y 联结的三相对称电阻, 每相电阻为 3 Ω。在额定电压下启动时, 转子绕组中的电流是多少(不考虑过渡过程)?

解 (1) 电动势比  $k_e$  和电流比  $k_i$ 。

因为忽略励磁电流, 所以空载时励磁电流在定子绕组的漏阻抗上的压降也可予以忽略, 故空载时相电动势之比即为相电压之比。设  $U_{10\phi}$ 、 $U_{20\phi}$  分别为定、转子空载相电压, 则

$$k_e = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} = \frac{U_{10\phi}}{U_{20\phi}} = \frac{U_{10\phi}}{60} = \frac{\sqrt{3}U_{10\phi}}{60}$$

绕线转子  $m_2 = m_1$ , 则

$$k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}} = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} = k_e$$

(2)  $Z'_{2\sigma}$  和  $R'_{st}$ 。

$$Z'_{2\sigma} = k_e k_i Z_{2\sigma} = \left( \frac{\sqrt{3}U_{10\phi}}{60} \right)^2 (R_2 + jX_{2\sigma}) = \left( \frac{\sqrt{3}U_{10\phi}}{60} \right)^2 (1.5 + j4.0)$$

$$R'_{st} = k_e k_i R_{st} = \left( \frac{\sqrt{3}U_{10\phi}}{60} \right)^2 R_{st} = \left( \frac{\sqrt{3}U_{10\phi}}{60} \right)^2 \times 3$$

(3) 启动电流  $I_{st}$  (用简化等效电路计算)。

$$\begin{aligned} I_{st} &\approx \frac{\dot{U}_{10\phi}}{Z_{1\sigma} + Z'_{2\sigma} + R'_{st}} = \frac{\dot{U}_{10\phi}}{2Z'_{2\sigma} + R'_{st}} \\ &= \frac{\dot{U}_{10\phi}}{\left( \frac{\sqrt{3}U_{10\phi}}{60} \right)^2 [2 \times (1.5 + j4.0) + 3]} \\ &= \frac{60^2}{3 \times U_{10\phi} (6 + j8)} \\ I_{st} &= \frac{3600}{3 \times U_{10\phi} \times 10} = \frac{120}{U_{10\phi}} = I'_{2st} \end{aligned}$$

$$\text{实际转子绕组中的启动电流 } I_{2st} = k_i I'_{2st} = k_i I_{st} = \frac{\sqrt{3}U_{10\phi}}{60} \times \frac{120}{U_{10\phi}} =$$

$$2\sqrt{3} \text{ A} = 3.464 \text{ A}.$$

9. 一台三相感应电动机, 极数  $2p = 4$ , 额定频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ , Y 联结, 已知:  $R_1 = 0.5 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = 2.0 \Omega$ ,  $R'_2 = 0.48 \Omega$ ,  $X'_{2\sigma} = 1.8 \Omega$ ,  $R_m = 3.5 \Omega$ ,  $X_m = 38.5 \Omega$ , 机械损耗和附加损耗  $p_n + p_\Delta = 148 \text{ W}$ 。

(1) 画出 T 形等效电路, 并写出定子相电流表达式;

(2) 若已求得当外施相电压  $\dot{U}_{1\phi} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$ ,  $n = 1455 \text{ r/min}$  时,  $\dot{I}_{1\phi} = 14.4 \angle -32.9^\circ \text{ A}$ , 试计算电动机输入功率、输出功率和效率。

解 (1) T 形等效电路图如图 5-12 所示, 定子电流  $\dot{I}_{1\phi}$  表达式为

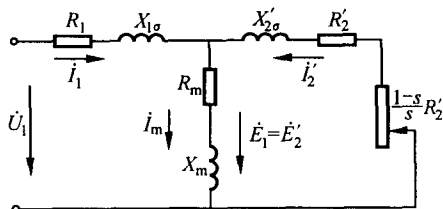


图 5-12 感应电动机的 T 形等效电路



$$I_{1\phi} = \frac{U_{1\phi}}{(R_1 + jX_{1\sigma}) + \frac{(R'_2/s + jX'_{2\sigma})(R_m + jX_m)}{(R'_2/s + jX'_{2\sigma}) + (R_m + jX_m)}}$$

(2)  $P_1$ 、 $P_2$  和  $\eta$ 。

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03$$

由  $I'_{2\phi} = I_{1\phi} \frac{R_m + jX_m}{\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma}\right) + (R_m + jX_m)}$ , 可得

$$\begin{aligned} I_{2\phi} &= I_{1\phi} \frac{\sqrt{R_m^2 + X_m^2}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s} + R_m\right)^2 + (X'_{2\sigma} + X_m)^2}} \\ &= 14.4 \times \frac{\sqrt{3.5^2 + 38.5^2}}{\sqrt{\left(\frac{0.48}{0.03} + 3.5\right)^2 + (1.8 + 38.5)^2}} \text{ A} \\ &= 14.4 \times \frac{38.66}{44.77} \text{ A} \\ &= 12.43 \text{ A} \end{aligned}$$

同理可得

$$\begin{aligned} I_{m\phi} &= I_{1\phi} \frac{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}'^2}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s} + R_m\right)^2 + (X'_{2\sigma} + X_m)^2}} \\ &= 14.4 \times \frac{\sqrt{\left(\frac{0.48}{0.03}\right)^2 + 1.8^2}}{\sqrt{\left(\frac{0.48}{0.03} + 3.5\right)^2 + (1.8 + 38.5)^2}} \text{ A} \\ &= 14.4 \times \frac{16.10}{44.77} \text{ A} \\ &= 5.18 \text{ A} \end{aligned}$$

$$p_{\text{Cu1}} = m_1 I_{1\phi}^2 R_1 = 3 \times 14.4^2 \times 0.5 \text{ W} = 311 \text{ W}$$

$$p_{\text{Cu2}} = m_1 I_{2\phi}^2 R'_2 = 3 \times 12.43^2 \times 0.48 \text{ W} = 222.5 \text{ W}$$

$$p_{\text{Fe}} = m_1 I_{m\phi}^2 R_m = 3 \times 5.18^2 \times 3.5 \text{ W} = 281.7 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \sum p &= p_{\text{Cu1}} + p_{\text{Cu2}} + p_{\text{Fe}} + p_{\text{N}} + p_{\Delta} \\ &= (311 + 222.5 + 281.7 + 148) \text{ W} \\ &= 963.2 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_1 &= m_1 U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 = 3 \times 220 \times 14.4 \times \cos 32.9^\circ \text{ W} \\ &= 7979.7 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_2 = P_1 - \sum p = (7979.7 - 963.2) \text{ W} = 7016.5 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{7016.5}{7979.7} \times 100\% = 87.9\%$$

10. 一台笼型三相感应电动机, 极数  $2p = 4$ , Y 联结, 额定电压  $U_{1N} = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_N = 60 \text{ Hz}$ 。已知其过载能力  $k_T = 2.5$ , 临界转差率  $s_m = 0.16$ 。现将该电动机接到  $346.4 \text{ V}$ 、 $50 \text{ Hz}$  的电源上, 问此时最大转矩为原来额定转矩的多少倍? 产生最大转矩时的转速为多少? (计算时定子电阻  $R_1$  可忽略不计, 并忽略机械损耗和附加损耗, 修正系数  $c = 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m}$  可以认为等于 1)

解 因为  $R_1$  可以忽略不计, 并考虑到  $\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi}{60} \times \frac{60f_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}$ , 故最大转矩

$$T_{\max} = \frac{m_1 U_{1\phi}^2}{2\Omega_s (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})} = \frac{pm_1 U_{1\phi}^2}{4\pi f_1 (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})}$$

由于漏电抗  $X_{1\sigma}$  和  $X'_{2\sigma}$  与电源频率  $f_1$  成正比, 因此上式可以写为

$$T_{\max} = K \left( \frac{U_{1\phi}}{f_1} \right)^2$$

式中:  $K$  为常数。

设  $U_{1\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 380 \text{ V} = 220 \text{ V}$ ,  $f_1 = 60 \text{ Hz}$  时最大转矩为

$T_{\max 60}; U_{1\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}}U_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 346.4 \text{ V} = 200 \text{ V}$ ,  $f_1 = 50 \text{ Hz}$  时最大转矩为  $T_{\max 50}$ , 则

$$\frac{T_{\max 50}}{T_{\max 60}} = \frac{\left(\frac{200}{50}\right)^2}{\left(\frac{220}{60}\right)^2} = 1.19$$

原来  $U_1 = 380 \text{ V}$ ,  $f_1 = 60 \text{ Hz}$  时额定转矩为  $T_N$ , 由题给定  $\frac{T_{\max 60}}{T_N} = 2.5$ , 故

$$\frac{T_{\max 50}}{T_N} = \frac{T_{\max 50}}{T_{\max 60}} \frac{T_{\max 60}}{T_N} = 1.19 \times 2.5 = 2.975$$

即在  $U_1 = 346.4 \text{ V}$ ,  $f_1 = 50 \text{ Hz}$  电源下工作时, 其最大转矩为原来额定转矩的 2.975 倍。

忽略  $R_1$  后, 临界转差率

$$s_m \approx \frac{R'_2}{X'_{1s} + X'_{2s}} = K_1 \left( \frac{1}{f_1} \right)$$

设原来在 60 Hz 电源下工作的临界转差率为  $s_{m60}$ , 改在 50 Hz 电源下工作时, 临界转差率变为  $s_{m50}$ , 则

$$\frac{s_{m50}}{s_{m60}} = \frac{K_1 \left( \frac{1}{50} \right)}{K_1 \left( \frac{1}{60} \right)} = 1.2$$

题目给定  $s_{m60} = 0.16$ , 故

$$s_{m50} = 1.2 \times s_{m60} = 1.2 \times 0.16 = 0.192$$

相应转速

$$\begin{aligned} n &= (1 - s_{m50})n_s = (1 - s_{m50}) \frac{60f_1}{2} \\ &= (1 - 0.192) \times \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} \\ &= 1212 \text{ r/min} \end{aligned}$$

11. 一台笼型三相感应电动机,  $2p = 4$ ,  $P_N = 22 \text{ kW}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ , Y 联结,  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $n_N = 1470 \text{ r/min}$ 。在额定电压和额定频率下运行

时,若该电动机产生最大转矩时的转子铜耗等于额定转矩时转子铜耗的 8 倍,忽略定子电阻和空载损耗,并且不考虑启动对槽电流集肤效应的影响,试计算:

(1) 额定转差率  $s_N$  和额定转矩  $T_N$ ;

(2) 临界转差率  $s_m$ ;

(3) 最大转矩  $T_{max}$ ;

(4) 启动转矩  $T_{st}$ 。

解 (1)  $s_N$  和  $T_N$ 。

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0.02$$

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi n_N}{60}} = \frac{22 \times 10^3}{\frac{2\pi \times 1470}{60}} \text{ N} \cdot \text{m} = 143 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 临界转差率  $s_m$ 。

由题目给定条件,在最大转矩时转子铜耗等于额定转矩时转子铜耗的 8 倍,按简化等效电路且不考虑定子电阻,此条件可表示为

$$m_1 \frac{U_{1\downarrow}^2}{(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 + \left(\frac{R'_2}{s_m}\right)^2} R'_2 = 8m_1 \frac{U_{1\downarrow}^2}{(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 + \left(\frac{R'_2}{s_N}\right)^2} R'_2$$

考虑到在最大转矩时,  $\frac{R'_2}{s_m} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$ , 可得

$$8 \left[ \left(\frac{R'_2}{s_m}\right)^2 + \left(\frac{R'_2}{s_m}\right)^2 \right] = \left(\frac{R'_2}{s_m}\right)^2 + \left(\frac{R'_2}{s_N}\right)^2$$

求解得

$$s_m = \sqrt{15} s_N = \sqrt{15} \times 0.02 = 0.0775$$

(3) 最大转矩。

由电磁转矩的实用表达式  $\frac{T}{T_{max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$ , 得

$$T_{max} = \frac{T_N}{2} \left( \frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N} \right) = \frac{143}{2} \times \left( \frac{0.02}{0.0775} + \frac{0.0775}{0.02} \right) \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$= 295.51 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(4) 启动转矩。

仍用上述简化公式,将  $s = 1$  代入,得

$$\begin{aligned} T_{st} &= T_{\max} \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = 295.51 \times \frac{2}{\frac{1}{0.0775} + \frac{0.0775}{1}} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 45.53 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

## 5.4 补充习题及解答

### 5.4.1 补充习题

1. 感应电动机与变压器有何异同点?
2. 感应电机中主磁通、漏磁通是怎样定义的?它们各由什么磁动势产生?
3. 为什么应尽量把感应电动机的气隙设计得小些?
4. 在感应电动机等效电路中,  $Z_m$  是反映什么的物理量?是否是变量?在额定电压下电动机由空载到负载,  $Z_m$  会变化吗?
5. 感应电动机的定、转子绕组极对数是否一定相等?为什么?
6. 一台绕线转子三相感应电动机,转子静止且开路,定子绕组加额定电压  $U_{1N}$ ,测得定子电流为  $I_1 = 0.3I_N$ 。然后将转子绕组短路并堵转(即转子静止不动),在定子绕组上从小到大地增加电压,使定子电流  $I_1 = I_N$ ,试比较两种情况下主磁通  $\Phi_m$  和漏磁通  $\Phi_{l\sigma}$  的大小有何变化?
7. 拆换感应电动机的定子绕组时,若把每相的匝数减少了,气隙中每极磁通将怎样变化?对电动机的功率因数和效率有何影响?
8. 感应电动机在额定电压下工作,电动机由空载到满载时,其等效电路中的定子漏电抗  $X_{1\sigma}$  和转子漏电抗  $X'_{2\sigma}$  是否会发生变化?为什么?
9. 为什么感应电动机空载运行时,转子边功率因数  $\cos\varphi_2$  很高,而定子边的功率因数  $\cos\varphi_1$  却很低?
10. 深槽型和双笼型感应电动机为什么启动转矩大而效率并不低?
11. 一台原来设计用在频率  $f_1 = 60 \text{ Hz}$  电源上的三相感应电动机,

能否用在电压相同,频率为 50 Hz 的电源上?

12. 一台笼型三相感应电动机,原来转子笼型绕组是铜条的,后因损坏,改为铝条的。如果输出同样的转矩,电动机的运行特性有什么变化?

13. 一台三相感应电动机的输入功率  $P_1 = 8.7 \text{ kW}$ , 定子铜耗  $p_{\text{Cu1}} = 440 \text{ W}$ , 铁耗  $p_{\text{Fe}} = 230 \text{ W}$ , 机械损耗和杂散损耗之和  $p_{\text{a}} + p_{\text{a}} = 289 \text{ W}$ , 转差率  $s = 0.03$ 。试计算该电动机的电磁功率  $P_{\text{e}}$ 、转子铜耗  $p_{\text{Cu2}}$ 、机械功率  $P_{\text{a}}$ 、输出功率  $P_2$  及效率  $\eta$ 。

14. 一台三相感应电动机,极数  $2p = 6$ , 额定电压  $U_{1\text{N}} = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_{\text{N}} = 50 \text{ Hz}$ , 额定功率  $P_{\text{N}} = 7.5 \text{ kW}$ , 额定转速  $n_{\text{N}} = 960 \text{ r/min}$ , 定子绕组为 Y 联结, 额定功率因数  $\cos\varphi_{\text{N}} = 0.82$ , 定子铜耗  $p_{\text{Cu1}} = 460 \text{ W}$ , 铁耗  $p_{\text{Fe}} = 210 \text{ W}$ , 机械损耗  $p_{\text{a}} = 45 \text{ W}$ , 杂散损耗  $p_{\text{a}} = 70 \text{ W}$ 。试计算在额定负载时的转差率  $s_{\text{N}}$ 、转子电流的频率  $f_2$ 、转子铜耗  $p_{\text{Cu2}}$ 、输入功率  $P_1$ 、效率  $\eta$  和定子电流  $I_1$ 。

15. 一台三相感应电动机,极数  $2p = 4$ , 额定功率  $P_{\text{N}} = 10 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_{\text{N}} = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_{\text{N}} = 50 \text{ Hz}$ , 额定转速  $n_{\text{N}} = 1455 \text{ r/min}$ , 定子绕组电阻  $R_1 = 1.38 \Omega$ , 定子绕组电抗  $X_{1\text{e}} = 2.42 \Omega$ , 转子绕组电阻  $R'_2 = 1.05 \Omega$ , 转子绕组电抗  $X'_{2\text{e}} = 4.41 \Omega$ , 励磁电阻  $R_{\text{m}} = 8.33 \Omega$ , 励磁电抗  $X_{\text{m}} = 82.7 \Omega$ , 定子绕组为  $\Delta$  联结。当额定负载时的机械损耗和杂散损耗之和  $p_{\text{a}} + p_{\text{a}} = 215 \text{ W}$  时, 试求额定转速时的定子电流  $I_1$ 、功率因数  $\cos\varphi_1$ 、输入功率  $P_1$  和效率  $\eta$ 。

16. 一台三相感应电动机,极数  $2p = 4$ , 额定功率  $P_{\text{N}} = 10 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_{1\text{N}} = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_{\text{N}} = 50 \text{ Hz}$ , 额定电流  $I_{1\text{N}} = 19.7 \text{ A}$ , 定子绕组为 Y 联结。额定运行时, 定子铜耗  $p_{\text{Cu1}} = 556 \text{ W}$ , 转子铜耗  $p_{\text{Cu2}} = 315 \text{ W}$ , 铁耗  $p_{\text{Fe}} = 278 \text{ W}$ , 机械损耗  $p_{\text{a}} = 200 \text{ W}$ , 杂散损耗  $p_{\text{a}} = 75 \text{ W}$ 。试计算该电动机额定负载时的额定转速  $n_{\text{N}}$ 、空载转矩  $T_0$ 、转轴上的输出转矩  $T_{\text{N}}$ 、电磁转矩  $T_{\text{e}}$ 。

17. 一台三相感应电动机, 额定电压  $U_{1\text{N}} = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_{\text{N}} = 50 \text{ Hz}$ , 定子绕组为  $\Delta$  联结, 定子绕组每相电阻  $R_1 = 0.42 \Omega$ , 其空载和短路试验数据如下:

空载试验,  $U_0 = U_N = 380 \text{ V}$ ,  $I_0 = 21.4 \text{ A}$ ,  $P_0 = 1.35 \text{ kW}$ ;

短路试验,  $U_K = 110 \text{ V}$ ,  $I_K = 66.9 \text{ A}$ ,  $P_K = 4.16 \text{ kW}$ 。

已知机械损耗  $p_\Omega = 102 \text{ W}$ ,  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$ , 试求该电动机的 T 形等效电路参数。

18. 一台绕线转子三相感应电动机, 极数  $2p = 4$ , 额定功率  $P_N = 150 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_N = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $R_1 = R'_2 = 0.014 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 0.065 \Omega$ 。当忽略励磁阻抗  $Z_m$  时, 试用简化等效电路求取:

(1) 直接启动时的启动转矩和启动电流;

(2) 在转子每相绕组中串入启动电阻  $R'_{st} = 0.12 \Omega$  时的启动转矩和启动电流;

(3) 在定子每相绕组中串入启动电抗  $X_{st} = 0.12 \Omega$  时的启动转矩和启动电流。

19. 一台笼型三相感应电动机, 极数  $2p = 6$ , 额定电压  $U_N = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ , 额定转速  $n_N = 960 \text{ r/min}$ , 定子绕组为 Y 联结,  $R_1 = 2.06 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = 3.13 \Omega$ ,  $R'_2 = 1.58 \Omega$ ,  $X'_{2\sigma} = 4.27 \Omega$ 。试求该电动机的额定转矩  $T_N$ , 最大转矩  $T_{\max}$ , 过载能力  $k_T$ , 最大转矩对应的临界转差率  $s_m$  (忽略空载转矩  $T_0$ )。

20. 一台绕线转子三相感应电动机, 极数  $2p = 4$ , 额定功率  $P_N = 150 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_N = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ , 定、转子绕组均为 Y 联结, 额定负载时测得转子铜耗  $p_{\text{Cu2}} = 2205 \text{ W}$ , 机械损耗  $p_\Omega = 2645 \text{ W}$ , 杂散损耗  $p_\Delta = 1010 \text{ W}$ 。其他电动机参数为  $R_1 = R'_2 = 0.013 \Omega$ ,  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 0.06 \Omega$ 。试求:

(1) 额定运行时的电磁功率  $P_e$ 、转差率  $s_N$ 、转速  $n_N$  和电磁转矩  $T_e$ ;

(2) 负载转矩不变 (认为  $T_e$  不变), 转子回路中串入调速电阻  $R'_\Omega = 0.10 \Omega$  时, 电动机的转差率  $s$ 、转速  $n$  和转子铜耗  $p_{\text{Cu2}}$ ;

(3) 转子回路不串电阻和串入调速电阻  $R'_\Omega$  两种情况下的临界转差率;

(4) 欲使启动时产生的转矩最大, 应在转子回路串入的启动电阻  $R'_{st}$  (归算到定子侧的值)。

21. 一台三相感应电动机, 极数  $2p = 6$ , 额定功率  $P_N = 75 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_N = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ , 额定转速  $n_N = 970 \text{ r/min}$ , 过载能力  $k_T = 2.15$ , 试求:

- (1) 额定转差率  $s_N$ ;
- (2) 额定转矩  $T_N$ ;
- (3) 最大转矩  $T_{\max}$ ;
- (4) 最大转矩对应的转差率  $s_m$ ;
- (5)  $s = 0.02$  时的电磁转矩  $T_e$ 。

#### 5.4.2 补充习题解答

1. 答 从基本电磁关系看, 感应电动机与变压器极为相似。感应电动机的定、转子和变压器的一、二次侧的电压、电流都是交流的。定、转子之间和一、二次侧之间的关系都是感应关系。它们的基本方程式、等效电路及相量图, 不论形式或推导过程都是很相似的。

它们本质上的差别主要有以下几点。

(1) 感应电动机的磁动势为三相合成磁动势, 是一种旋转磁动势; 而变压器中的磁动势是脉振磁动势。

(2) 感应电动机转子绕组的电动势和电流的频率  $f_2 = sf_1$ , 不仅取决于定子电流的频率  $f_1$ , 而且还与转子的转速有关, 故在推导等效电路时应先进行频率归算; 而变压器二次绕组中电动势和电流的频率  $f_2$  与一次绕组中电流的频率  $f_1$  相同, 即  $f_2 = f_1$ 。

(3) 感应电动机的绕组一般是短距和分布的, 而变压器的绕组是整距和集中的, 所以两者的磁动势、电动势公式中就有绕组因数之异。

(4) 在感应电动机中, 既有能量传递, 又有能量变换, 即把电能变成机械能; 而在变压器中只有能量传递, 没有能量变换, 它只能把一种电压等级的电能变成另一种电压等级的电能。

(5) 同容量的感应电动机与变压器相比, 感应电动机的气隙大, 空载电流(励磁电流)大, 功率因数低, 等效电路中励磁电抗的数值小; 而变压器的气隙小, 空载电流(励磁电流)小, 功率因数高, 等效电路中励磁电抗的数值大。



2. 答 作用在三相感应电机磁路上的磁动势(主要考虑基波磁动势)在磁路里产生磁通。通常把通过气隙同时交链(又称匝链)定、转子两个绕组的磁通称为主磁通,气隙中每极磁通用  $\Phi_m$  表示;把不交链转子绕组而只交链定子绕组本身的磁通称为定子绕组漏磁通,简称定子漏磁通,用  $\Phi_{l1}$  表示;同理,把不交链定子绕组而只交链转子绕组本身的磁通称为转子绕组漏磁通,简称转子漏磁通,用  $\Phi_{l2}$  表示。

主磁通  $\Phi_m$  是由三相合成磁动势  $F_m$  产生的,而定子漏磁通  $\Phi_{l1}$  是由定子磁动势  $F_1$  产生的,转子漏磁通  $\Phi_{l2}$  是由转子磁动势  $F_2$  产生的。

3. 答 在电机中,定、转子之间必须有一定的间隙(称为气隙),否则电机的转子就无法旋转。气隙又是电机主磁路的一部分。由于在感应电动机主磁路中,产生同样大小的气隙每极磁通时,气隙越小,主磁路的磁阻就越小,所需要的励磁磁动势  $F_m$  和励磁电流  $I_m$  就越小,这对提高感应电动机的功率因数有很大的好处,所以在设计感应电动机时,要求在定、转子不发生机械碰撞的前提下,尽量把电动机的气隙设计得小一些。

4. 答  $Z_m$  是感应电动机的励磁阻抗,是反映铁心磁化特性和铁耗的物理量。由于感应电动机的主磁路主要由铁磁材料构成,而铁磁材料的磁化曲线是非线性的,即磁导率  $\mu$  随饱和程度的提高而降低,故  $Z_m$  将随饱和程度的增加而减小。严格地说,  $Z_m$  不是常量。但是,通常由于电源电压  $U_1$  是一定的,在正常工作范围内,主磁通可以看做不变,这样铁心的饱和程度也就一定,此时  $Z_m$  可以近似地认为是一个常量。

在额定电压下,感应电动机由空载到满载时,由于定子电流  $I_1$  增加,定子漏阻抗压降  $I_1 Z_{l1}$  也增加,由式  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 Z_{l1}$  可知,定子绕组感应电动势  $\dot{E}_1$  略有减小,则磁路饱和程度略有降低,故  $Z_m$  将略有增加。

5. 答 感应电动机定、转子绕组的极对数是一定相等的,否则,感应电动机就不能正常工作。

设定子绕组极对数为  $p_1$ ,转子绕组极对数为  $p_2$ ,定子电流频率为  $f_1$ ,则定子磁动势  $F_1$  相对于定子的转速为  $n_1 = \frac{60 f_1}{p_1}$ 。设转子转速为  $n$ ,

转向与定子磁动势转向一致,则定子磁动势相对于转子绕组的转速为  $(n_1 - n)$ ,因此,定子磁场在转子绕组感应电动势的频率为  $f_2 = \frac{p_1}{60}(n_1 - n)$ ,同理,转子电流的频率也为  $f_2$ ,由转子电流产生的转子磁动势  $F_2$  相对于转子的转速为  $n_2 = \frac{60f_2}{p_2} = \frac{p_1}{p_2}(n_1 - n)$ ,而转子磁动势  $F_2$  相对于定子的转速为  $n'_2 = n_2 + n = \frac{p_1}{p_2}(n_1 - n) + n$ 。可见,当  $p_2 = p_1$  时,  $n'_2 = n_1$ ,定、转子磁动势相对静止,能建立稳定的合成磁场,产生电磁转矩,感应电动机能正常运行。否则,若  $p_2 \neq p_1$ ,则定、转子磁动势将不同步,存在相对运动,不能建立稳定的气隙磁场,所产生的平均电磁转矩为零,感应电动机不能正常工作。

6. 答 定子加额定电压  $U_{1N}$  且转子开路时,相当于感应电动机空载运行,定子电流  $I_1$  为额定电压下的空载电流  $I_{10}$ ,忽略定子漏阻抗压降后,定子感应电动势  $E_1 \approx U_{1N}$ ,电动机主磁通  $\Phi_m = \frac{E_1}{4.44fk_{w1}N_1} = \frac{U_{1N}}{4.44fk_{w1}N_1}$ ,因此  $\Phi_m$  较大;但是,由于  $I_1 (= I_{10})$  较小,故定子磁动势  $F_1$  较小,定子漏磁通  $\Phi_l$  也较小。

转子短路且转子静止(堵转)时,相当于感应电动机堵转试验(短路试验)或降压启动状态,电源电压较低,所以定子感应电动势  $E_1$  较小,电动机主磁通  $\Phi_m$  较小;但是,由于  $I_1 (= I_N)$  较大,故定子磁动势  $F_1$  较大,定子漏磁通  $\Phi_l$  也较大。

7. 答 因为定子绕组感应电动势  $E_1 = 4.44fN_1k_{w1}\Phi_1$ ,所以,如果拆换感应电动机的定子绕组时,误将每相的匝数减少了,则当电源电压和频率一定时,电动机气隙中每极磁通  $\Phi_1$  相应地要增大。

如果电动机的主磁路原来就已工作在饱和区,现在主磁通增大了,就会使主磁路更加饱和。这样,所需的励磁磁动势  $F_m$  要大得多(非线性增大)。另外,匝数  $N_1$  的减少,将会使励磁电流  $I_m$  更加增大,励磁电流  $I_m$  的急剧增大,将使电动机的功率因数  $\cos\varphi$  下降,定子铜耗  $p_{Cu1}$  增大。此外,主磁通  $\Phi_1$  增大,使电动机的铁耗  $p_{Fe}$  也增大,使电动机的效率降

低。

8. 答 在额定电压下,感应电动机由空载到满载时,其等效电路中的定子漏电抗  $X_{1\sigma}$  和转子漏电抗  $X'_{2\sigma}$  是常数,它们不随电流的大小而发生变化。因为定、转子漏磁路是以线性磁路(空气隙)为主,所以定子电流  $I_1$  与定子漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$ ,转子电流  $I_2$  与转子漏磁通  $\Phi_{2\sigma}$  之间成正比关系。所以漏电抗  $X_{1\sigma}$  和  $X'_{2\sigma}$  都是常数。

只有当感应电动机在额定电压下直接启动时,因启动电流非常大,电动机的漏磁路也出现了饱和现象(因漏磁路中有一部分铁磁材料),漏磁路才会变为非线性的,从而引起漏磁路的磁导率减小,导致漏磁导减小,与之对应的漏电抗随之减小。等启动完毕,漏电抗又为常值。

9. 答 感应电动机在空载运行时,转差率  $s$  极小,接近于零。于是转子频率  $f_2 = sf_1$  很低,转子漏电抗  $X_{2s} = sX_{2\sigma}$  很小,也接近于零。这样一来,转子的功率因数角  $\varphi_2 \left( = \arctan \frac{X_{2s}}{R_2} \right)$  也接近于零。所以转子的功率因数  $\cos\varphi_2 \approx 1$ 。

但是,感应电动机空载运行时,定子绕组中尚有很大的励磁电流,此电流为无功电流,它与电压  $\dot{U}_1$  之间的夹角近于  $90^\circ$ 。因此,定子边的功率因数  $\cos\varphi_1$  很低,约为 0.2。

10. 答 感应电动机在启动时,转子电流频率  $f_2 (= sf_1)$  很高,集肤效应强烈,使槽电流(导条电流)分布趋于槽口,相当于槽导体的有效截面积减小,而转子电阻增大,故限制了启动电流而增大了启动转矩。

当感应电动机启动完毕,正常运行时,转子电流频率很低,集肤效应基本上消失,电流分布均匀,相当于转子电阻比启动时减小,则转子铜耗不大,故效率并不太低。

11. 答 因为  $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1k_{w1}\Phi_1$ ,所以当电源电压  $U_1$  一定时,若频率由 60 Hz 变为 50 Hz,电机的气隙每极磁通将增加 20%。考虑到铁心饱和的影响,励磁电流的增加将超过 20%,从而引起感应电动机的总电流增大,铜耗增加,温升增加,效率和功率因数均下降。

由于铁耗  $p_{Fe} \propto f^2 B_m^2$ ,当频率由 60 Hz 变为 50 Hz 时,  
 $p'_{Fe} \propto \left(\frac{50}{60}f\right)^\beta \left(\frac{60}{50}B_m\right)^2$ ,因  $\beta$  在 1.2 ~ 1.6 范围内,所以铁耗增加,同样

会使电机的温升增加,效率降低。

电源频率下降后,电动机的转速降低,使风量减小,散热条件变差,电动机的温升将显著增加。因此,在电源电压不变的情况下,60 Hz 的电动机接在 50 Hz 的电源上时,常因过热而不能使用。

**12. 答** 转子绕组由铜条的改为铝条的后,相当于转子回路的电阻增大,使得电动机启动电流  $I_{st}$  减小,启动转矩  $T_{st}$  增大,临界转差率  $s_m$  增大,但最大转矩  $T_{max}$  不变。

在负载转矩不变的情况下,为保证  $\frac{R_{2Cu}}{s} = \frac{R_{2Al}}{s'} = \text{常数}$ ,转差率  $s'$  将增大,转子转速将下降。

另外,因为负载转矩不变,所以转子电流不变,但转子电阻增大,会使转子铜耗增加,导致电动机的效率下降。

**13. 解** (1) 电磁功率

$$P_e = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} = (8700 - 440 - 230) \text{ W} = 8030 \text{ W}$$

(2) 转子铜耗

$$p_{Cu2} = sP_e = 0.03 \times 8030 \text{ W} = 240.9 \text{ W}$$

(3) 机械功率

$$P_n = P_e - p_{Cu2} = (8030 - 240.9) \text{ W} = 7789.1 \text{ W}$$

(4) 输出功率

$$P_2 = P_n - (p_n + p_\Delta) = (7789.1 - 289) \text{ W} = 7.5 \text{ kW}$$

(5) 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{7500}{8700} \times 100\% = 86.2\%$$

**14. 解** (1) 转差率  $s_N$ 。

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} \text{ r/min} = 1000 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04$$

(2) 转子电流频率

$$f_2 = sf_1 = 0.04 \times 50 \text{ Hz} = 2 \text{ Hz}$$

(3) 转子铜耗  $p_{Cu2}$ 。

$$P_{\Omega} = P_2 + p_{\Omega} + p_{\Delta} = (7500 + 45 + 70) \text{ W} = 7615 \text{ W}$$

$$p_{\text{Cu2}} = \frac{s}{1-s} P_{\Omega} = \frac{0.04}{1-0.04} \times 7615 \text{ W} = 317.3 \text{ W}$$

(4) 输入功率

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 + p_{\text{Cu1}} + p_{\text{Fe}} + p_{\text{Cu2}} + p_{\Omega} + p_{\Delta} \\ &= (7500 + 460 + 210 + 317.3 + 45 + 70) \text{ W} \\ &= 8602.3 \text{ W} \end{aligned}$$

(5) 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{7500}{8602.3} \times 100\% = 87.2\%$$

(6) 定子电流

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 \cos \varphi_N} = \frac{8602.3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.82} \text{ A} = 15.94 \text{ A}$$

15. 解 由 T 形等效电路求解。

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03$$

$$\frac{R'_2}{s_N} = \frac{1.05}{0.03} \Omega = 35 \Omega$$

$$\frac{1-s_N}{s_N} R'_2 = \frac{1-0.03}{0.03} \times 1.05 \Omega = 33.95 \Omega$$

$$Z'_{2s} + \frac{1-s_N}{s_N} R'_2 = \frac{R'_2}{s_N} + jX'_{2s} = (35 + j4.41) \Omega$$

$$= 35.28 \angle 7.22^\circ \Omega$$

$$Z_m = R_m + jX_m = (8.33 + j82.7) \Omega = 83.12 \angle 84.25^\circ \Omega$$

$$\frac{Z_m \left( Z'_{2s} + \frac{1-s_N}{s_N} R'_2 \right)}{Z_m + \left( Z'_{2s} + \frac{1-s_N}{s_N} R'_2 \right)} = \frac{35.28 \angle 7.22^\circ \times 83.12 \angle 84.25^\circ}{8.33 + j82.7 + 35 + j4.41} \Omega$$

$$= \frac{2932.47 \angle 91.47^\circ}{97.29 \angle 63.55^\circ} \Omega = 30.14 \angle 27.92^\circ \Omega$$

$$= (26.63 + j14.11) \Omega$$

$$\begin{aligned}
 Z_{\Sigma} &= Z_{1\sigma} + \frac{Z_m \left( Z'_{2\sigma} + \frac{1-s_N}{s_N} R'_2 \right)}{Z_m + \left( Z'_{2\sigma} + \frac{1-s_N}{s_N} R'_2 \right)} \\
 &= (1.38 + j2.42 + 26.63 + j14.11) \Omega \\
 &= (28.01 + j16.53) \Omega = 32.52 \angle 30.54^\circ \Omega \\
 I_{1\phi} &= \frac{\dot{U}_{1\phi}}{Z_{\Sigma}} = \frac{380 \angle 0^\circ}{32.52 \angle 30.54^\circ} \text{ A} = 11.69 \angle -30.54^\circ \text{ A}
 \end{aligned}$$

定子相电流有效值为

$$I_{1\phi} = 11.69 \text{ A}$$

定子线电流

$$I_1 = \sqrt{3} I_{1\phi} = \sqrt{3} \times 11.69 \text{ A} = 20.25 \text{ A}$$

功率因数

$$\cos \varphi_1 = \cos 30.54^\circ = 0.86 \quad (\text{滞后})$$

输入功率

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \times 380 \times 20.25 \times \cos 30.54^\circ \text{ W} \\
 &= 11479 \text{ W} = 11.5 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{10}{11.5} \times 100\% = 86.9\%$$

## 16. 解 电磁功率

$$\begin{aligned}
 P_e &= P_N + p_{\text{Cu2}} + p_{\Omega} + p_{\Delta} = (10000 + 315 + 200 + 75) \text{ W} \\
 &= 10590 \text{ W}
 \end{aligned}$$

额定转差率

$$s_N = \frac{p_{\text{Cu2}}}{P_e} = \frac{315}{10590} = 0.0297$$

同步转速

$$n_s = \frac{60 f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

1) 额定转速

$$n_N = (1 - s_N) n_s = (1 - 0.0297) \times 1500 \text{ r/min} = 1455 \text{ r/min}$$

2) 空载转矩

$$T_0 = \frac{p_0 + p_\Delta}{\Omega_N} = \frac{p_0 + p_\Delta}{\frac{2\pi n_N}{60}} = \frac{200 + 75}{\frac{2\pi \times 1455}{60}} \text{ N} \cdot \text{m} = 1.806 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3) 轴上输出的转矩

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi n_N}{60}} = \frac{10000}{\frac{2\pi \times 1455}{60}} \text{ N} \cdot \text{m} = 65.66 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4) 电磁转矩

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{P_e}{\frac{2\pi n_s}{60}} = \frac{10590}{\frac{2\pi \times 1500}{60}} \text{ N} \cdot \text{m} = 67.45 \text{ N} \cdot \text{m}$$

17. 解 (1) 短路参数为

$$Z_K = \frac{U_{K\phi}}{I_{K\phi}} = \frac{110}{\frac{66.9}{\sqrt{3}}} \Omega = 2.848 \Omega$$

$$R_K = \frac{P_K}{3I_{K\phi}^2} = \frac{4160}{3 \times \left(\frac{66.9}{\sqrt{3}}\right)^2} \Omega = 0.929 \Omega$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{2.848^2 - 0.929^2} \Omega = 2.692 \Omega$$

$$R'_2 = R_K - R_1 = (0.929 - 0.42) \Omega = 0.509 \Omega$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{1}{2} X_K = \frac{1}{2} \times 2.692 \Omega = 1.346 \Omega$$

(2) 励磁参数为

$$\begin{aligned} p_{Fe} &= P_0 - m_1 R_1 I_{0\phi}^2 - p_n \\ &= \left[ 1350 - 3 \times 0.42 \times \left(\frac{21.4}{\sqrt{3}}\right)^2 - 102 \right] \text{ W} \\ &= 1055.7 \text{ W} \end{aligned}$$

$$R_m = \frac{p_{Fe}}{3I_{0\phi}^2} = \frac{1055.7}{3 \times \left(\frac{21.4}{\sqrt{3}}\right)^2} \Omega = 2.305 \Omega$$

$$X_0 = \frac{U_{0\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{380}{\frac{21.4}{\sqrt{3}}} \Omega = 30.755 \Omega$$

$$X_m = X_0 - X_{1\sigma} = (30.755 - 1.346) \Omega = 29.41 \Omega$$

18. 解 忽略  $Z_m$ , 修正系数  $c = 1$ 。

$$n_s = \frac{60 f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

$$\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi \times 1500}{60} \text{ rad/s} = 157 \text{ rad/s}$$

(1) 直接启动时的启动转矩和启动电流。

$$\begin{aligned} T_{st} &= \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1\phi}^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} \\ &= \frac{3}{157} \times \frac{220^2 \times 0.014}{(0.014 + 1 \times 0.014)^2 + (0.065 + 1 \times 0.065)^2} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 732.2 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{st} &= \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}} \\ &= \frac{220}{\sqrt{(0.014 + 1 \times 0.014)^2 + (0.065 + 1 \times 0.065)^2}} \text{ A} \\ &= 1654.4 \text{ A} \end{aligned}$$

(2) 转子绕组串入  $R'_{st}$  启动时的启动转矩和启动电流。

$$\begin{aligned} T_{st} &= \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1\phi}^2 (R'_2 + R'_{st})}{(R_1 + cR'_2 + cR'_{st})^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} \\ &= \frac{3}{157} \times \frac{220^2 \times (0.014 + 0.12)}{(0.014 + 1 \times 0.014 + 1 \times 0.12)^2 + (0.065 + 1 \times 0.065)^2} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 3193.7 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{st} &= \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + cR'_2 + cR'_{st})^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}} \\ &= \frac{220}{\sqrt{(0.014 + 1 \times 0.014 + 1 \times 0.12)^2 + (0.065 + 1 \times 0.065)^2}} \text{ A} \\ &= 1116.8 \text{ A} \end{aligned}$$

(3) 定子绕组串入  $X_{st}$  启动时的启动转矩和启动电流。



$$\begin{aligned}
 T_{st} &= \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1\phi}^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + X_{st} + cX'_{2\sigma})^2} \\
 &= \frac{3}{157} \times \frac{220^2 \times 0.014}{(0.014 + 1 \times 0.014)^2 + (0.065 + 0.12 + 1 \times 0.065)^2} \text{ N} \cdot \text{m} \\
 &= 204.6 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{st} &= \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + cR'_2) + (X_{1\sigma} + X_{st} + cX'_{2\sigma})^2}} \\
 &= \frac{220}{\sqrt{(0.014 + 1 \times 0.014)^2 + (0.065 + 0.12 + 1 \times 0.065)^2}} \text{ A} \\
 &= 874.5 \text{ A}
 \end{aligned}$$

19. 解 设修正系数  $c = 1$ 。

$$n_s = \frac{60 f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{3} \text{ r/min} = 1000 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04$$

$$\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi \times 1000}{60} \text{ rad/s} = 104.67 \text{ rad/s}$$

忽略  $T_0$ , 则

$$\begin{aligned}
 T_N &\approx T_e = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1\phi}^2 \frac{R'_2}{s_N}}{\left(R_1 + c \frac{R'_2}{s_N}\right)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} \\
 &= \frac{3}{104.67} \times \frac{220^2 \times \frac{1.58}{0.04}}{\left(2.06 + 1 \times \frac{1.58}{0.04}\right)^2 + (3.13 + 1 \times 4.27)^2} \text{ N} \cdot \text{m} \\
 &= 30.75 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{\max} &= \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_{1\phi}^2}{2c[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}]} \\
 &= \frac{3}{104.67} \times \frac{220^2}{2 \times 1 \times [2.06 + \sqrt{2.06^2 + (3.13 + 1 \times 4.27)^2}]} \text{ N} \cdot \text{m} \\
 &= 71.2 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

$$k_T = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{71.2}{30.75} = 2.32$$

$$\begin{aligned}
 s_m &= \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}} \\
 &= \frac{1 \times 1.58}{\sqrt{2.06^2 + (3.13 + 1 \times 4.27)^2}} = 0.21
 \end{aligned}$$

20. 解 (1) 额定运行时的  $P_e$ 、 $s_N$ 、 $n_N$  和  $T_e$ 。

$$n_s = \frac{60f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1500 \text{ r/min}$$

$$\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi \times 1500}{60} \text{ rad/s} = 157 \text{ rad/s}$$

$$\begin{aligned}
 P_e &= P_2 + p_{\text{Cu2}} + p_n + p_\Delta = (150000 + 2205 + 2645 + 1010) \text{ W} \\
 &= 155860 \text{ W} = 155.86 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$s_N = \frac{p_{\text{Cu2}}}{P_e} = \frac{2205}{155860} = 0.0141$$

$$n_N = (1 - s_N)n_s = (1 - 0.0141) \times 1500 \text{ r/min} = 1479 \text{ r/min}$$

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{155860}{157} \text{ N} \cdot \text{m} = 992.7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2)  $T_e$  不变, 转子串入调速电阻  $R'_n$  时的  $s$ 、 $n$  和  $p_{\text{Cu2}}$ 。

因为  $T_e$  不变, 则有

$$\frac{R'_2}{s_N} = \frac{R'_2 + R'_n}{s}$$

$$s = \frac{R'_2 + R'_n}{R'_2} s_N = \frac{0.013 + 0.10}{0.013} \times 0.0141 = 0.1226$$

$$n = (1 - s)n_s = (1 - 0.1226) \times 1500 \text{ r/min} = 1316 \text{ r/min}$$

$$p_{\text{Cu2}} = sP_e = 0.1226 \times 155860 \text{ W} = 19108 \text{ W} = 19.108 \text{ kW}$$

(3) 临界转差率(设修正系数  $c = 1$ )。

转子回路不串电阻时, 有

$$\begin{aligned}
 s_m &= \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}} = \frac{1 \times 0.013}{\sqrt{0.013^2 + (0.06 + 1 \times 0.06)^2}} \\
 &= 0.1077
 \end{aligned}$$

转子回路串入调速电阻  $R'_n$  时, 有

$$s_m = \frac{c(R'_2 + R'_0)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}} = \frac{1 \times (0.013 + 0.10)}{\sqrt{0.013^2 + (0.06 + 1 \times 0.06)^2}} \\ = 0.936$$

(4) 欲使  $T_{st} = T_{\max}$ , 即使  $s_m = 1$ , 则应有

$$R'_2 = \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} - R'_0 \\ = (\sqrt{0.013^2 + (0.06 + 1 \times 0.06)^2} - 0.013) \Omega \\ = 0.1077 \Omega$$

## 21. 解

$$n_s = \frac{60f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{3} \text{ r/min} = 1000 \text{ r/min}$$

(1) 额定转差率  $s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1000 - 970}{1000} = 0.03$

(2) 额定转矩

$$T_N = 9.55 \times \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{75 \times 10^3}{970} \text{ N} \cdot \text{m} = 738.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(3) 最大转矩

$$T_{\max} = k_T T_N = 2.15 \times 738.4 \text{ N} \cdot \text{m} = 1587.6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(4) 最大转矩对应的转差率

$$s_m = s_N(k_T + \sqrt{k_T^2 - 1}) = 0.03 \times (2.15 + \sqrt{2.15^2 - 1}) = 0.122$$

(5)  $s = 0.02$  时的电磁转矩

$$T_e = \frac{2T_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times 1587.6}{\frac{0.02}{0.122} + \frac{0.122}{0.02}} \text{ N} \cdot \text{m} = 506.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

## 第6章 同步电机

### 6.1 重点和难点

#### 6.1.1 重点

##### 1. 重要概念

(1) 同步发电机分为两大类：汽轮发电机和水轮发电机。汽轮发电机均采用隐极结构；水轮发电机一般采用凸极结构。

(2) 同步电机的运行状态。同步电机的运行状态取决于转子主磁场与定子合成磁场之间的夹角  $\delta$ ， $\delta$  称为功率角。根据  $\delta$  的不同，同步电机的运行状态有三种：

$\delta > 0^\circ$  时，同步电机作发电机运行；

$\delta < 0^\circ$  时，同步电机作电动机运行；

$\delta = 0^\circ$  时，同步电机作补偿机运行。

(3) 同步发电机的额定值之间的关系如下。

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_N}$$

或

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}$$

式中： $I_N$  为额定电流(A)； $U_N$  为额定电压(V)； $\cos\varphi_N$  为额定功率因数； $P_N$  为额定功率(W)； $S_N$  为额定容量(VA)。

$$n_N = \frac{60f_N}{p}$$

式中： $n_N$  为转子额定转速(r/min)； $f_N$  为电网频率(Hz)； $p$  为电机的极对数。

(4) 励磁电动势  $\dot{E}_0$  是主磁场在电枢绕组中感应产生的相电动势。

$$\dot{E}_0 = -j4.44fN_1k_{w1}\dot{\Phi}_0$$

式中:  $N_1 k_{w1}$  为定子绕组的有效串联匝数;  $\Phi_0$  为主磁极磁场的每极磁通。

## 2. 对称负载时的电枢反应

(1) 电枢反应的概念: 电枢磁动势的基波对主磁极磁场基波的影响称为电枢反应。

(2) 电枢反应的性质: 电枢反应的性质取决于电枢磁动势和主磁场在空间的相对位置。此相对位置取决于励磁电动势  $\dot{E}_0$  和负载电流  $\dot{I}$  之间的相位差  $\psi_0$ ,  $\psi_0$  称为内功率因数角。

$\dot{I}$  与  $\dot{E}_0$  同相,  $\psi_0 = 0^\circ$  时, 电枢磁动势  $F_a$  是一个交轴磁动势, 即

$$F_a(\psi_0 = 0^\circ) = F_{aq}$$

电枢反应的性质是交磁。

$\dot{I}$  滞后  $\dot{E}_0$   $90^\circ$ ,  $\psi_0 = 90^\circ$  时, 电枢磁动势  $F_a$  滞后主磁极磁动势  $F_f$   $180^\circ$  电角度,  $F_a$  是直轴磁动势, 且起去磁作用。

$\dot{I}$  超前  $\dot{E}_0$   $90^\circ$ ,  $\psi_0 = -90^\circ$  时, 电枢磁动势  $F_a$  与主磁极磁动势  $F_f$  同相位,  $F_a$  是直轴磁动势, 且起增磁作用。

在一般情况下,  $0^\circ < \psi_0 < 90^\circ$  时, 电枢磁动势  $F_a$  可分解为直轴和交轴两个分量, 即

$$F_a = F_{ad} + F_{aq}$$

式中:  $F_{ad} = F_a \sin \psi_0$ , 是直轴磁动势, 起去磁(或增磁)作用;  $F_{aq} = F_a \cos \psi_0$ , 是交轴磁动势, 起交磁作用。

相应地, 电枢电流  $\dot{I}$  也可以分解成两个分量, 即

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$$

式中:  $\dot{I}_d = \dot{I} \sin \psi_0$ , 称为电枢电流的直轴分量;  $\dot{I}_q = \dot{I} \cos \psi_0$ , 称为电枢电流的交轴分量。

## 3. 双反应理论

分析凸极同步电机的电枢反应时, 可把电枢磁动势  $F_a$  分解成直轴磁动势  $F_{ad}$  和交轴磁动势  $F_{aq}$  两个分量, 再用对应的等效直轴磁导和等效的交轴磁导分别算出直轴和交轴电枢反应, 再把它们叠加起来。这种处理方法, 称为双反应理论。

## 4. 同步电抗的概念

同步电抗是对称稳态运行时表征电枢反应和电枢漏磁场这两个效应的一个综合参数。它包括两部分：与漏磁场对应的漏电抗和与电枢磁场对应的电枢反应电抗。

## (1) 隐极电机的同步电抗

$$X_s = X_a + X_l$$

式中： $X_a$  为电枢反应电抗； $X_l$  为电枢漏电抗。

## (2) 凸极电机的同步电抗为

$$\text{直轴同步电抗 } X_d = X_{ad} + X_l$$

$$\text{交轴同步电抗 } X_q = X_{aq} + X_l$$

式中： $X_{ad}$  为直轴电枢反应电抗； $X_{aq}$  为交轴电枢反应电抗。

(3) 同步电抗的测定。直轴同步电抗  $X_d$  (或  $X_s$ ) 可用空载特性和短路特性确定。

$$X_{d(\text{不饱和})} = \frac{E_0}{I}$$

式中： $E_0$  和  $I$  分别为同一励磁电流对应的空载励磁电动势和短路电流，如图 6-1 所示。

$$X_{d(\text{饱和})} = \frac{U_{N*}}{I'}$$

式中： $I'$  的概念及查取如图 6-2 所示。

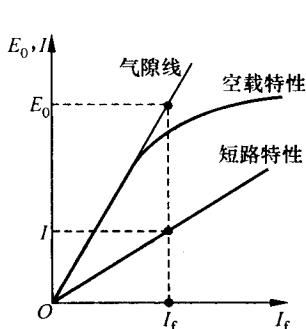


图 6-1 用空载特性和短路特性来确定  $X_{d(\text{不饱和})}$

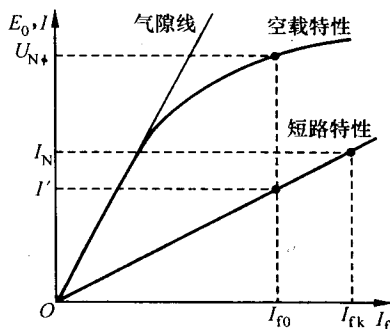


图 6-2  $X_{d(\text{饱和})}$  的确定

## 5. 隐极同步发电机的电压方程和相量图

## (1) 不考虑饱和时电压方程为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + I\dot{R}_a + jI\dot{X}_s$$

式中:  $\dot{U}$  为电枢相电压;  $R_a$  为电枢电阻;  $X_s$  为同步电抗。对应的相量图如图 6-3 所示。

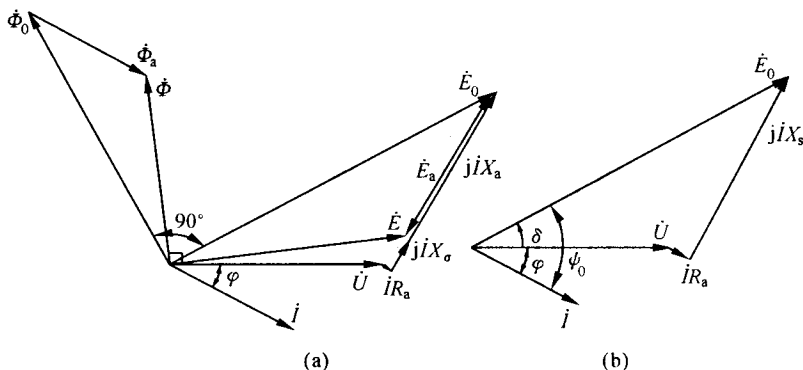


图 6-3 不饱和时隐极同步发电机的相量图

## (2) 考虑饱和时电压方程为

$$\dot{E} = \dot{U} + I\dot{R}_a + jI\dot{X}_s$$

式中:  $\dot{E}$  为气隙电动势。对应的相量图如图 6-4 所示。

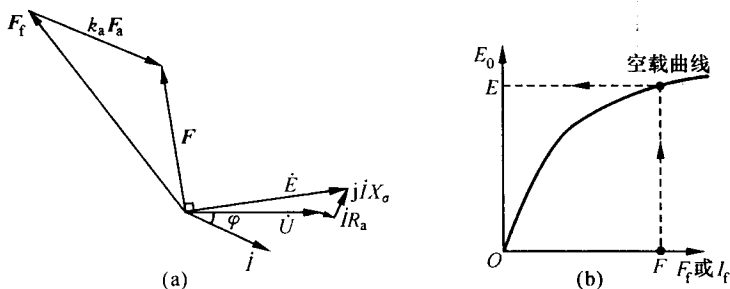


图 6-4 饱和时隐极同步发电机的相量图

(a) 磁动势的矢量图和电动势的相量图; (b) 由合成磁动势  $F$  确定气隙电动势  $E$

## 6. 凸极同步发电机的电压方程和相量图

(1) 电压方程为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$$

(2) 相量图。凸极同步发电机的相量图如图 6-5 所示。

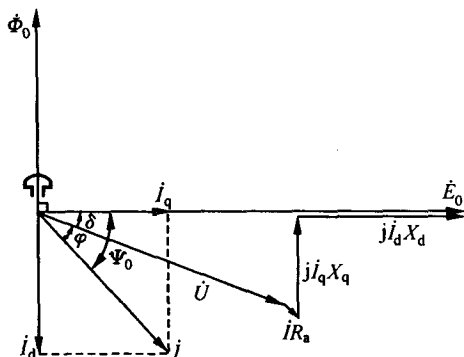


图 6-5 凸极同步发电机的相量图

7. 虚拟电动势的概念及内功率因数角  $\psi_0$  的确定

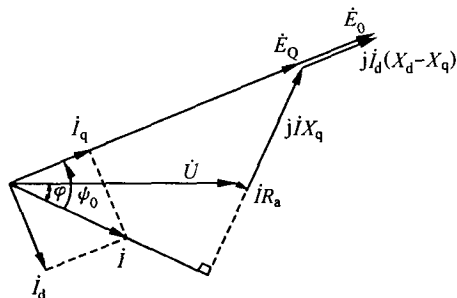
(1) 虚拟电动势  $\dot{E}_Q$ 。虚拟电动势  $\dot{E}_Q$  是为了导出内功率因数角  $\psi_0$  而引入的一个虚拟物理量。 $\dot{E}_Q$  的定义为

$$\dot{E}_Q = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d(X_d - X_q)$$

即

$$\dot{E}_Q = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_q$$

引入虚拟电动势  $\dot{E}_Q$  后, 凸极同步发电机的相量图如图 6-6 所示。由图 6-6 可看出,  $\dot{E}_Q$  与  $\dot{E}_0$  同相位。

图 6-6  $\psi_0$  角的确定



## (2) 内功率因数角

$$\psi_0 = \arctan \frac{U \sin \varphi + I X_q}{U \cos \varphi + I R_s}$$

## 8. 同步发电机的功率方程和电磁功率

## (1) 功率方程为

$$P_1 = P_e + p_\Omega + p_{Fe}$$

$$P_e = P_2 + p_{Cua}$$

式中:  $P_1 = T_1 \Omega$  为发电机轴上输入的机械功率;  $P_2 = mUI \cos \varphi$  为定子出线端输出的电功率;  $P_e$  是电磁功率;  $p_\Omega$  是机械损耗;  $p_{Fe}$  是铁耗;  $p_{Cua} = mI^2 R_s$  是电枢铜耗。

功率方程式亦可写成

$$P_1 = P_2 + \sum p = P_2 + p_\Omega + p_{Fe} + p_{Cua}$$

## (2) 电磁功率

$$P_e = mEI \cos \psi = mE_Q I \cos \psi_0 = T_e \Omega$$

式中:  $\psi$  为相量  $\dot{E}$  与  $\dot{I}$  的夹角;  $T_e$  为电磁转矩。

对于隐极同步发电机, 因为  $X_d = X_q = X_s$ , 所以  $\dot{E}_Q = \dot{E}_0$ , 故有

$$P_e = mE_0 I \cos \psi_0 = mE_0 I_q$$

上式表明, 电枢电流的交轴分量  $I_q$  或交轴电枢反应是发电机进行机电能量转换的必要条件。

## 9. 同步发电机的运行特性

同步发电机的运行特性如下。

(1) 空载特性。  $n = n_s$  为定值,  $I = 0$  时,  $U_0 = f(I_f)$ 。

(2) 外特性。  $n = n_s$ ,  $I_f = \text{常数}$ ,  $\cos \varphi = \text{常数}$  时,  $U = f(I)$ 。

(3) 调整特性。  $n = n_s$ ,  $U = U_{N\phi}$ ,  $\cos \varphi = \text{常数}$  时,  $I_f = f(I)$ 。

(4) 效率特性。  $n = n_s$ ,  $U = U_{N\phi}$ ,  $\cos \varphi = \cos \varphi_N$  时,  $\eta = f(P_2)$ 。

10. 电压调整率  $\Delta u$ 

$$\Delta u = \frac{E_0 - U_{N\phi}}{U_{N\phi}} \times 100\%$$

式中:  $E_0$  为额定励磁电流时的空载端电压。

## 11. 同步发电机投入并联的条件

投入并联运行的同步发电机应当满足下列三个条件：

- ① 发电机的相序应与电网一致；
- ② 发电机的频率应与电网相同；
- ③ 发电机的励磁电动势  $E_0$  应与电网电压  $\dot{U}$  大小相等，相位相同，即  $E_0 = \dot{U}$ 。

上述三个条件中，第一个条件必须满足，其他两个条件允许稍有出入。

## 12. 同步发电机的功角特性

(1) 隐极同步发电机的功角特性为

$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \delta$$

式中： $\delta$  为功率角，是相量  $E_0$  与  $\dot{U}$  的夹角。

按照发电机惯例，当  $E_0$  超前  $\dot{U}$  时， $\delta > 0$ ，此时电磁功率  $P_e > 0$ ，电磁功率的传递方向是由转子传向定子的方向。

(2) 凸极同步发电机的功角特性为

$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

式中：第一项  $P_{e1} = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta$  为基本电磁功率；第二项  $P_{e2} = m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$  为附加电磁功率，亦称磁阻功率。

## 13. 静态稳定、整步功率系数和过载能力的概念

(1) 静态稳定。与电网并联运行的发电机受到扰动且在扰动消失后能否恢复到原来的状态下稳定运行的问题，就是静态稳定问题。若能恢复，则是稳定的；反之，则是不稳定的。

(2) 整步功率系数  $\frac{dP_e}{d\delta}$ 。

对于隐极电机， $\frac{dP_e}{d\delta} = m \frac{E_0 U}{X_s} \cos \delta$

对于凸极电机， $\frac{dP_e}{d\delta} = m \frac{E_0 U}{X_d} \cos \delta + m U^2 \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta$

(3) 同步发电机静态稳定的判据。

若  $\frac{dP_e}{d\delta} > 0$ , 则发电机静态稳定;

若  $\frac{dP_e}{d\delta} < 0$ , 则发电机静态不稳定;

若  $\frac{dP_e}{d\delta} = 0$ , 则发电机达到静态稳定的极限。

(4) 过载能力  $k_p$ 。

最大电磁功率  $P_{e(\max)}$  与额定功率  $P_N$  的比值, 称为同步发电机的过载能力, 即

$$k_p = \frac{P_{e(\max)}}{P_N}$$

对于隐极同步发电机,  $\delta = 90^\circ$ ,  $\sin\delta = 1$ , 电磁功率  $P_e$  达极限值

$$P_{e(\max)} = m \frac{E_0 U}{X_s}$$

所以, 其过载能力

$$k_p = \frac{P_{e(\max)}}{P_N} \approx \frac{m \frac{E_0 U}{X_s}}{m \frac{E_0 U}{X_s} \sin\delta_N} = \frac{1}{\sin\delta_N}$$

#### 14. 同步发电机并联运行时有功功率和无功功率的调节

(1) 有功功率的调节。调节原动机的输入功率, 使功率角  $\delta$  变化, 则电磁功率  $P_e$  变化, 发电机的输出功率变化。

(2) 无功功率的调节。当原动机输入的有功功率不变时, 调节同步发电机的励磁, 即可调节无功功率。

同步发电机并联运行时,  $U = U_N$ ,  $f = f_N$ , 保持  $P_1$  不变, 则  $P_e \approx$  常数,  $P_2 \approx$  常数, 此时  $E_0 \sin\delta =$  常数,  $I \cos\varphi =$  常数。

正常励磁, 即励磁电动势为  $\dot{E}_0$ , 电枢电流为  $\dot{I}$ , 功率因数  $\cos\varphi = 1$  时, 励磁电流  $I_f$  称为正常励磁。此时  $\cos\varphi = 1$ ,  $\sin\varphi = 0$ , 所以同步发电机输出的功率全部是有功功率, 输出的无功功率为零。

过励, 即  $I'_f > I_f$  时, 发电机除输出一定的有功功率之外, 还将输出滞后的无功功率。

欠励, 即  $I'_f < I_f$  时, 发电机除输出一定的有功功率外, 还将输出超

前的无功功率。

### 15. 同步电动机的电压方程和相量图

采用电动机惯例,  $\dot{U}$  超前  $\dot{E}_0$  时, 功率角  $\delta_M$  为正,  $\dot{I}_M$  超前  $\dot{U}$  时, 功率因数角  $\varphi_M$  为正。

(1) 隐极同步电动机的电压方程为

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_M R_a + j \dot{I}_M X_s$$

对应的相量图和等效电路如图 6-7 所示。

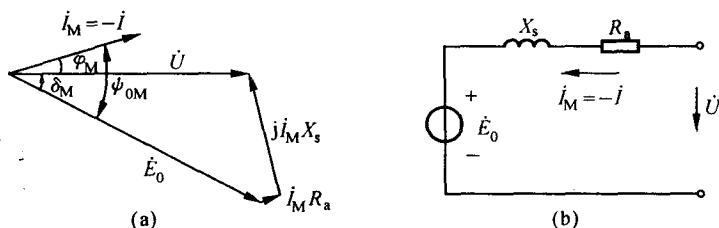


图 6-7 隐极同步电动机的相量图和等效电路(电动机惯例)

(a) 相量图; (b) 等效电路

(2) 凸极同步电动机的电压方程为

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_M R_a + j \dot{I}_{dM} X_d + j \dot{I}_{qM} X_q$$

对应的相量图如图 6-8 所示。

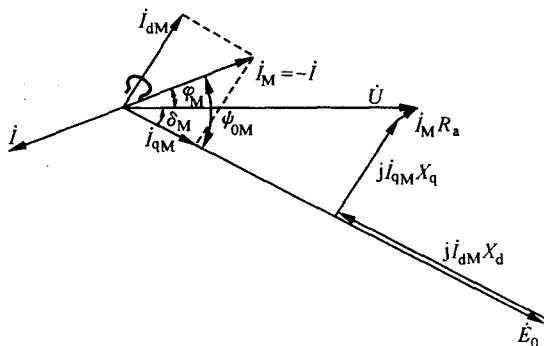


图 6-8 凸极同步电动机的相量图

(3) 内功率因数角

$$\psi_0 = \arctan \frac{U \sin \varphi_M + I_M X_q}{U \cos \varphi_M - I_M R_a}$$

## 16. 同步电动机的功角特性和功率方程

## (1) 功角特性为

$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta_M + m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_M$$

当  $U$  超前  $E_0$  时,  $\delta_M$  为正,  $P_e$  为正, 此时电磁转矩  $T_e$  是拖动转矩, 电磁功率由定子传向转子。

## (2) 功率方程为

$$P_e = P_1 - p_{\text{Cua}}$$

$$P_2 = P_e - p_\Omega - p_{\text{Fe}}$$

或

$$P_2 = P_1 - (p_{\text{Cua}} + p_\Omega + p_{\text{Fe}})$$

式中:  $P_1 = mUI \cos \varphi$  为输入的电功率;  $P_2 = T_2 \Omega$  为输出的机械功率;  $p_{\text{Cua}} = mI^2 R_s$  为电枢铜耗;  $p_{\text{Fe}}$  为铁耗;  $p_\Omega$  为机械损耗。

## 17. 同步电动机的 V 形曲线

同步电动机的 V 形曲线是指  $U = U_N$ ,  $P_e = \text{常数}$  时, 电枢电流  $I_M$  与励磁电流  $I_f$  的关系曲线  $I_M = f(I_f)$ , 如图 6-9 所示。

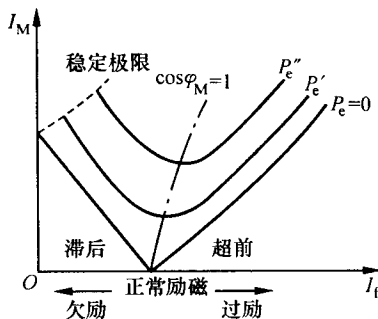


图 6-9 同步电动机的 V 形曲线

(1) V 形曲线的最低点是“正常励磁”,  $\cos \varphi = 1$  的工作点。

(2) 右侧为“过励”状态, 功率因数为超前。

(3) 左侧为“欠励”状态, 功率因数为滞后。

(4) 对于某一负载, 当减小励磁至图中虚线所示数值时, 达到稳定极限。若继续减小励磁, 将出现不稳定现象。

## 18. 同步电动机的启动方法

(1) 异步启动法。在同步电动机的主极极靴上装设笼型启动绕组,电动机就依靠启动绕组通电后产生的异步启动转矩启动。需要特别注意的是:异步启动时,转子励磁绕组既不能开路,又不能直接短路,而是要串接一个限流电阻。

(2) 辅助电动机启动法。用与同步电动机极数相同的感应电动机作为辅助电动机,将同步电动机拖动到接近同步转速时,用自整步法把同步电动机投入电网。

(3) 调频启动法。若有三相变频电源,则可在启动时将电源频率调得很低,这时定子的旋转磁场转得很慢,转子加励磁建立主磁场,依靠定、转子磁场之间的同步电磁转矩使电动机启动,转子旋转起来之后,逐步提高电源频率,转子被定子旋转磁场牵着逐渐升速,直至达到同步转速为止。

## 19. 对称分量法

对称分量法是用来分析不对称运行的基本方法。若电机为对称、磁路为线性,那么可以将三相不对称分量分解为正序、负序和零序三组对称分量,然后应用叠加原理,分别求出这三组对称分量单独作用时所产生的响应,再把结果叠加,得到总的响应,这种分析方法,就是对称分量法。

## 20. 三相不对称分量(以电压为例)的分解公式

(1) 三相不对称电压的分解。

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A+} + \dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0} = \dot{U}_+ + \dot{U}_- + \dot{U}_0$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B+} + \dot{U}_{B-} + \dot{U}_{B0} = a^2 \dot{U}_+ + a \dot{U}_- + \dot{U}_0$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C+} + \dot{U}_{C-} + \dot{U}_{C0} = a \dot{U}_+ + a^2 \dot{U}_- + \dot{U}_0$$

式中: $\dot{U}_{A+}$ 、 $\dot{U}_{B+}$ 、 $\dot{U}_{C+}$  为对称的三相正序电压,  $\dot{U}_{A+} = \dot{U}_+$ ;  $\dot{U}_{A-}$ 、 $\dot{U}_{B-}$ 、 $\dot{U}_{C-}$  为对称的三相负序电压,  $\dot{U}_{A-} = \dot{U}_-$ ;  $\dot{U}_{A0}$ 、 $\dot{U}_{B0}$ 、 $\dot{U}_{C0}$  为大小、相位均相同的零序电压,  $\dot{U}_{A0} = \dot{U}_0$ ;  $a$  为复数算子,  $a = e^{j120^\circ} = 1 \angle 120^\circ$ 。

(2) 正序、负序和零序分量的计算。

已知不对称分量  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ , 则其对称分量为

$$\dot{U}_+ = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + a \dot{U}_B + a^2 \dot{U}_C)$$

$$\dot{U}_- = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)$$

### 21. 同步发电机的各序阻抗

(1) 正序阻抗  $Z_+ = R_+ + jX_+$

式中:  $R_+ = R_s$ ,  $X_+ = X_s$  (隐极电机);  $X_+$  的值在  $X_d$  和  $X_{q+}$  之间,  $X_{d+} = X_d$ ,  $X_{q+} = X_q$  (凸极电机)。

(2) 负序阻抗

$$Z_- = R_- + jX_-$$

① 无阻尼绕组时, 有

$$R_- = R_s$$

$$X_- \approx \frac{1}{2}(X'_d + X'_q)$$

式中:  $X'_d = X_s + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fo}}}$  为直轴瞬变电抗;  $X'_q = X_s + X_{sq} = X_q$  为交轴瞬变电抗。

② 有阻尼绕组时, 有

$$R_- = R_s + \frac{1}{4}(R_D + R_Q)$$

式中:  $R_D$  为直轴阻尼绕组电阻;  $R_Q$  为交轴阻尼绕组电阻。

$$X_- \approx \frac{1}{2}(X''_d + X''_q)$$

式中:  $X''_d = X_s + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fo}} + \frac{1}{X_{Do}}}$  为直轴超瞬变电抗;  $X''_q = X_s + \frac{1}{\frac{1}{X_{sq}} + \frac{1}{X_{Qo}}}$  为交轴超瞬变电抗。

(3) 零序阻抗  $Z_0 = R_0 + jX_0$

### 22. 同步发电机的稳态短路电流

(1) 单相稳态短路电流 
$$I_{K1} = \frac{3E_0}{X_+ + X_- + X_0}$$

## (2) 两相稳态短路电流

$$I_{K2} = \frac{\sqrt{3}E_0}{X_+ + X_-}$$

## (3) 三相稳态短路电流

$$I_{K3} = \frac{E_0}{X_+}$$

## 6.1.2 难点

## 1. 直轴和交轴电枢反应对同步发电机运行的影响

交轴电枢反应与有功功率和能量转换有关,直轴电枢反应与无功功率和电压变化、励磁调节有关。

## 2. 定量计算

综合运用同步电机的电压方程、相量图和功角特性等知识,对同步发电机、同步电动机、同步补偿机进行定量计算。

## 3. 用电动势-磁动势图求取额定励磁电流和电压调整率求取步骤如下(见图 6-10)。

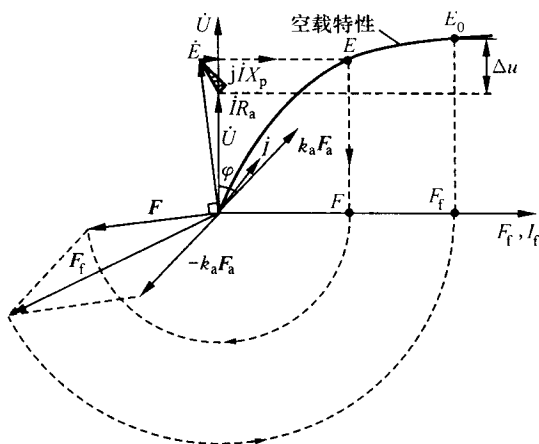


图 6-10 用电动势-磁动势图(波梯图)确定同步发电机的  $I_{fN}$  和  $\Delta u$



① 根据已知数据作出空载特性曲线。

② 作出与电压方程

$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_p$$

对应的电压相量图,将相量  $\dot{U}$  取在纵轴上。公式中的  $X_p$  为波梯电抗。

③ 在空载特性曲线上查取产生气隙电动势  $\dot{E}$  所需的合成磁动势  $F$ ,在超前  $\dot{E}90^\circ$  处作矢量  $F$ 。

④ 根据磁动势方程  $F_i = F + (-k_a F_a)$  作磁动势矢量图,得到励磁磁动势  $F_i$ 。

⑤ 将  $F_i$  转投到空载特性上,可求出该励磁磁动势下的空载电动势  $E_0$ ,根据

$$\Delta u = \frac{E_0 - U_{N\phi}}{U_{N\phi}} \times 100\%$$

及

$$I_i = \frac{F_i}{N}$$

可求得电压调整率  $\Delta u$  及励磁电流  $I_i$ 。

4. 同步发电机的有功功率和无功率的调节

这部分内容与重点 13 相同,不再重复介绍。

5. 发电机发出的有功功率和无功率的最大允许值

(1) 输出能力曲线。当  $U = U_N$ ,发电机输出的有功功率为  $P$  时,允许输出的最大无功功率  $Q$  与有功功率  $P$  之间的关系  $Q = f(P)$ ,即为发电机的输出能力曲线。

(2) 有功功率和无功率的最大允许值。发电机发出的有功功率最大允许值受电枢电流或电枢绕组温升的限制,其容许输出的最大有功功率等于  $S_N$ 。

发电机发出的最大无功功率受励磁电流或励磁绕组温升的限制,当励磁电流为额定值,同步发电机作补偿机运行时,发电机发出最大的滞后无功功率。

6. 用对称分量法对不对称短路问题进行分析

(1) 根据短路特点列出短路故障处各序电压和对应电流的关系式。

(2) 根据短路发生的特点将各序等效电路联结起来,求出各序电流

和电压。

(3) 把正序、负序、零序分量叠加,求得各相电压和电流。

## 6.2 习题详解

6-1 汽轮发电机和水轮发电机在结构上有何区别?原因何在?

答 汽轮发电机和水轮发电机在结构上的主要区别在于转子结构不同,汽轮发电机采用隐极式转子结构,水轮发电机采用凸极式转子结构。另外,汽轮发电机一般均为卧式结构,大型水轮发电机常采用立式结构。

现代的汽轮发电机一般都是两极的,同步转速为  $3000 \text{ r/min}$ 。由于转速高,转子受到极大的机械应力,为了提高转子的机械强度,将转子做成隐极式的,即转子铁心采用整块的高强度合金钢锻成,沿转子表面约  $2/3$  部分铣有轴向凹槽,励磁绕组分散地嵌放在槽中,因此,励磁绕组的固定极为可靠,嵌线部分和未开槽的“大齿”构成主磁极,这种隐极式转子结构机械强度高,适合于高速运行的汽轮发电机。另外,由于转速高,汽轮发电机的直径较小,长度较长,所以一般均为卧式结构。

水轮发电机的转速低,转子的离心力较小,转子承受的机械应力较小,故采用制造简单、励磁绕组集中安放的凸极式结构较为合理。另外,由于大型水轮发电机极数多、转速低,要求转动惯量大,故其特点是直径大,长度短,大型水轮发电机通常采用立式结构。

6-2 同步电机有几种运行状态?

答 同步电机有三种运行状态:发电机状态、补偿机状态和电动机状态。

当转子主磁极超前于定子合成磁场,即两磁场轴线之间的夹角  $\delta > 0$  时,转子由于要克服制动性质的电磁转矩而输入机械功率,定子绕组向电网或负载输出电功率,电机作为发电机运行。

当转子主磁场与定子合成磁场的轴线重合,即  $\delta = 0$  时,电机的电磁转矩为零,此时电机内没有有功功率的转换,电机只发出或吸收无功功率,电机处于补偿机状态或空载状态。

当转子主磁场滞后于定子合成磁场,即  $\delta < 0$  时,电机转子上将受到一个与其转向相同的驱动性质的电磁转矩。此时定子从电网吸收电

功率,转子可拖动机械负载而输出机械功率,电机作为电动机运行。

### 6-3 试述同步电机的主要励磁方式。

答 同步电机的主要励磁方式如下。

(1) 直流励磁机励磁。直流励磁机通常与同步发电机同轴联结,其励磁绕组采用并励或他励接法。当采用他励时,励磁机的励磁由副励磁机供给。为使同步发电机的输出电压保持恒定,常在励磁电路中加入一个反映负载大小的自动调节系统,即复式励磁系统。

(2) 整流器励磁。整流器励磁又分为静止式和旋转式两种。静止整流器励磁系统中的主励磁机是一台与同步发电机同轴联结的三相 100 Hz 发电机,其交流输出经静止三相桥式不可控整流器整流后,通过集电环接到主发电机的励磁绕组,供给其直流励磁;主励磁机的励磁由交流副励磁机发出的交流电经静止可控整流器整流后供给,副励磁机是一台中频三相同步发电机,亦与主发电机同轴联结;主发电机的励磁通过电压调节器调节。旋转式整流器励磁系统的主励磁机是与主发电机同轴联结的旋转电枢式三相同步发电机,电枢的交流输出经与主轴一起旋转的不可控整流器整流后,形成直流励磁电流送到主发电机的转子励磁绕组;因为主励磁机的电枢、整流装置和主发电机的励磁绕组三者为同轴旋转,不再需要集电环和电刷,所以这种系统又称为无刷励磁系统。

6-4 同步发电机电枢反应的性质取决于什么?交轴和直轴电枢反应对同步发电机的运行有何影响?

答 电枢磁动势的基波在气隙中所产生的磁场对主磁极磁场基波的影响称为电枢反应。

同步发电机电枢反应的性质取决于电枢磁动势和励磁磁动势幅值在空间的相对位置,而此位置与励磁电动势  $E_0$  和负载电流  $I$  之间的相位差  $\psi_0$  有关。

当  $E_0$  与  $I$  同相,即  $\psi_0 = 0^\circ$  时,电枢磁动势  $F_a$  的轴线与主磁极的轴线正交,即位于从主极轴线逆转子转向后移  $90^\circ$  电角度的位置,主磁极轴线称为直轴,与直轴成  $90^\circ$  电角度的轴线称为交轴,所以  $\psi_0 = 0^\circ$  时的电枢磁动势称为交轴磁动势,其所产生的电枢反应称为交轴电枢反应。

交轴电枢反应使气隙合成磁场的幅值增加,而合成磁场的轴线滞后主磁极轴线一个锐角。

当  $E_0$  超前  $I$   $90^\circ$  或  $E_0$  滞后  $I$   $90^\circ$  时,  $\psi_0 = 90^\circ$  或  $\psi_0 = -90^\circ$ , 电枢磁动势  $F_a$  的轴线与主极轴线方向相反或相同,这时的电枢磁动势称为直轴电枢磁动势,所产生的电枢反应称为直轴电枢反应。当  $\psi_0 = 90^\circ$  时,直轴电枢反应是去磁的;当  $\psi_0 = -90^\circ$  时,直轴电枢反应是增磁的;一般情况下,  $0^\circ < \psi_0 < 90^\circ$ , 这时电枢反应兼有直轴去磁作用和交轴作用。

对于同步发电机,当  $\psi_0 = 0^\circ$  时,由于主磁场超前于气隙合成磁场,交轴电枢反应使主磁极受到一个制动性质的电磁转矩,为使转子能以同步转速持续旋转,转子必须从原动机输入驱动转矩,从而输入机械功率,并完成向电功率的转换;当  $\psi_0 = 90^\circ$  或  $\psi_0 = -90^\circ$  时,其直轴电枢反应使气隙内的合成磁通减少或增加,从而使发电机的端电压产生变动,如果发电机接在电网上,直轴电枢反应对无功功率和功率因数有影响。

**6-5** 试说明隐极同步发电机带上纯电阻负载时,电枢反应的性质。

**答** 先画出隐极同步发电机带纯电阻负载时的相量图(见图 6-11)。

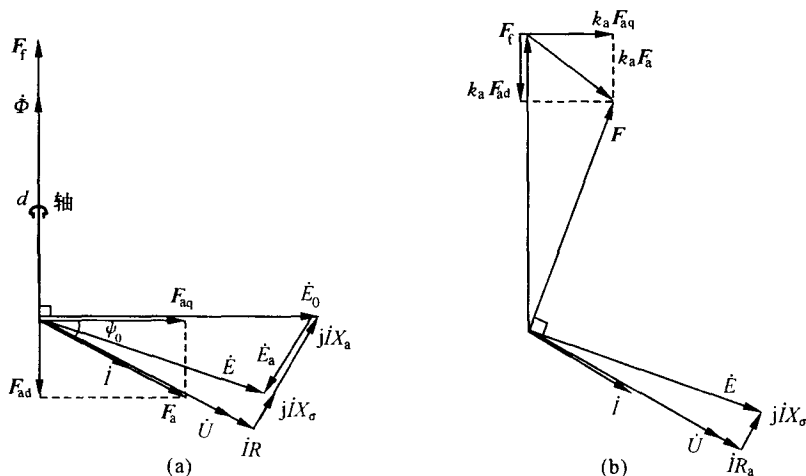


图 6-11 隐极同步发电机的相量图

(a) 不考虑饱和时; (b) 考虑饱和时

当发电机的负载为纯电阻负载时,电枢电流  $\dot{I}$  与电压  $\dot{U}$  同相位。不考虑饱和时,由相量图(见图 6-11(a))可知,电枢电流  $\dot{I}$  滞后励磁电动势  $\dot{E}_0$  电角度  $\psi_0$ ,  $0^\circ < \psi_0 < 90^\circ$ , 电枢电流产生的电枢磁动势  $F_a$  滞后于主极磁动势  $F_f$  电角度  $(90^\circ + \psi_0)$ , 此时  $F_a$  可以分解成两个分量:一个是直轴磁动势  $F_{ad}$ , 它与  $F_f$  方向相反, 所以, 它所产生的电枢反应对主磁极起去磁作用; 另外一个分量是交轴磁动势  $F_{aq}$ , 它滞后  $F_f$  电角度  $90^\circ$ , 所以, 它所产生的电枢反应是使主磁极受到一个制动性质的电磁转矩, 实现由机械能到电能的能量转换。

考虑饱和时,由相量图(见图 6-11(b))可知,电枢磁动势  $F_a$  滞后主极磁动势  $F_f$  的电角度, 同样在  $90^\circ \sim 180^\circ$  之间, 所以, 电枢反应的性质与不考虑饱和时的结论相同。

**6-6** 为什么分析凸极同步发电机时要用双反应理论? 凸极同步发电机负载运行时, 若  $\psi_0$  既不等于  $0^\circ$ , 又不等于  $90^\circ$ , 问电枢磁场的基波与电枢磁动势的基波在空间是否同相(不计磁饱和), 为什么?

**答** 凸极同步发电机气隙不均匀, 极面下气隙较小, 两极之间气隙较大, 因而沿电枢圆周各点单位面积的气隙磁导各不相同。这样, 同样大小的电枢磁动势作用在直轴和交轴上时所产生的电枢磁场将有明显差别, 因此, 定量分析电枢反应的作用需要应用双反应理论, 即将电枢磁动势分解成直轴和交轴两个分量, 再用对应的直轴磁导和交轴磁导分别算出直轴和交轴电枢反应, 最后再把它们叠加起来。

当  $\psi_0$  既不等于  $0^\circ$ , 又不等于  $90^\circ$  时, 电枢磁场的基波与电枢磁动势的基波在空间不同相。因为当  $0^\circ < |\psi_0| < 90^\circ$  时, 应用双反应理论, 电枢磁动势的基波  $F_a$  可以分解为直轴磁动势  $F_{ad}$  和交轴磁动势  $F_{aq}$ , 直轴磁动势建立直轴电枢磁场, 由于气隙比磁导的分布关于直轴对称, 所以直轴电枢磁场的基波  $B_{ad1}$  与  $F_{ad}$  同相; 同理, 交轴电枢磁动势建立的交轴电枢磁场的基波  $B_{aq1}$  与  $F_{aq}$  同相; 但由于气隙比磁导不均匀, 交轴的气隙比磁导比直轴的气隙比磁导小得多, 所以交轴电枢磁场

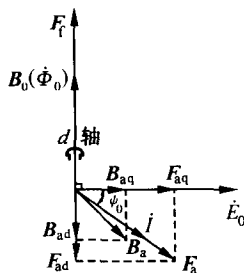


图 6-12 习题 6-6 的时 - 空矢量图

的基波  $B_{aq1}$  相应小得多, 所以  $\frac{B_{ad1}}{B_{aq1}} \neq \frac{F_{ad}}{F_{aq}}$ , 所以交、直轴电枢磁场的基波合成后形成的基波电枢磁场与基波电枢磁动势不同相, 如图 6-12 所示。

6-7 试述直轴和交轴同步电抗的意义。 $X_d$  和  $X_q$  的大小与哪些因素有关?  $X_d^*$  和  $X_q^*$  通常在什么范围内?

答 直轴同步电抗  $X_d = X_{ad} + X_s$ , 交轴同步电抗  $X_q = X_{aq} + X_s$ 。 $X_{ad}$  和  $X_{aq}$  分别称为直轴电枢反应电抗和交轴电枢反应电抗, 它们分别反映了直轴电枢反应和交轴电枢反应的强弱,  $X_s$  是电枢漏电抗, 反映了电枢漏磁场的大小。

因为  $E_d = I_d X_d$ ,  $E_q = I_q X_q$ , 所以  $X_d$  和  $X_q$  分别表示当直轴电枢电流和交轴电枢电流为 1A 时, 直轴或交轴电枢总磁场在电枢绕组中的感应相电动势, 它们是表征对称稳态运行时电枢漏磁场和直、交轴电枢反应的综合参数。

因为电抗  $X = 2\pi f \cdot L$ ,  $f$  是电流交变的频率,  $L$  是电感, 电感  $L$  与绕组每相有效串联匝数的平方和所经磁路的磁导成正比, 所以, 直轴同步电抗  $X_d$  与电流频率、电枢每相有效串联匝数的平方和直轴磁路的磁导成正比, 交轴同步电抗  $X_q$  与电枢电流频率、电枢每相有效串联匝数的平方和交轴磁路的磁导成正比。

现代同步电机  $X_d^*$  和  $X_q^*$  的范围:

汽轮发电机,  $X_d^*$  取  $0.90 \sim 2.5$ ,  $X_q^* \approx 0.9 X_d^*$ ;

凸极同步发电机,  $X_d^*$  取  $0.70 \sim 1.50$ ;  $X_q^*$  取  $0.40 \sim 1.0$ ;

凸极同步电动机,  $X_d^*$  取  $1.30 \sim 2.0$ ,  $X_q^*$  取  $0.80 \sim 1.3$ 。

6-8 有一台 70000 kVA、60000 kW、13.8 kV (Y 联结) 的三相水轮发电机, 交、直轴同步电抗的标幺值分别为  $X_q^* = 0.7$ ,  $X_d^* = 1.0$ , 试求额定负载时发电机的励磁电动势  $E_0^*$  (不计磁饱和与定子电阻)。

解 额定负载时:  $U = U_N$ ,  $I = I_N$ ,  $P_2 = P_N$ 。

所以  $U^* = 1$ ,  $I^* = 1$

负载功率因数

$$\cos\varphi = \frac{P_N}{S_N} = \frac{60000}{70000} = 0.857$$

功率因数角

$$\varphi = \arccos 0.857 = 31^\circ$$

$$\sin\varphi = \sin 31^\circ = 0.515$$

内功率因数角

$$\psi_0 = \arctan \frac{U^* \sin\varphi + I^* X_q^*}{U^* \cos\varphi + I^* R_s^*} = \arctan \frac{0.515 + 0.7}{0.857 + 0} = 54.8^\circ$$

功率角

$$\delta = \psi_0 - \varphi = 54.8^\circ - 31^\circ = 23.8^\circ$$

以励磁电动势作为参考相量,有

$$\dot{E}_0^* = E_0^* \angle 0^\circ, \dot{U}^* = 1 \angle (-\delta) = \cos 23.8^\circ - j \sin 23.8^\circ$$

$$\dot{I}^* = 1 \angle (-\psi_0) = \cos 54.8^\circ - j \sin 54.8^\circ$$

电流的直轴分量

$$\dot{I}_d^* = -j I^* \sin\psi_0 = -j \sin 54.8^\circ$$

电流的交轴分量

$$\dot{I}_q^* = I^* \cos\psi_0 = \cos 54.8^\circ$$

不计磁饱和与定子电阻,凸极同步发电机的电压方程为

$$\dot{E}_0^* = \dot{U}^* + j \dot{I}_d^* X_d^* + j \dot{I}_q^* X_q^*$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \dot{E}_0^* &= \cos 23.8^\circ - j \sin 23.8^\circ + 1 \times \sin 54.8^\circ + j 0.7 \cos 54.8^\circ \\ &= 1.732 \end{aligned}$$

6-9 有一台汽轮发电机的数据如下:额定容量  $S_N = 15000 \text{ kVA}$ , 额定电压  $U_N = 6.3 \text{ kV}$  (Y联结), 额定功率因数  $\cos\varphi_N = 0.8$  (滞后)。由空载、短路实验得到的数据如下表。

励磁电流 $I_f/\text{A}$	102	158
电枢电流 $I$ (从短路特性上查得)/A	887	1375
线电压 $U_L$ (从空载特性上查得)/V	6300	7350
线电压 $U_L$ (从气隙线上查得)/V	8000	12390

试求:

(1) 同步电抗的实际值和标么值;

(2) 不计饱和与电枢电阻,额定负载时发电机的励磁电动势  $E_0$ 。

解 励磁电流  $I_f = 102 \text{ A}$  时,从气隙线上查得励磁电动势  $E_0 = 8000/\sqrt{3} \text{ V} = 4618.8 \text{ V}$ ,由短路特性查得同一励磁电流对应的短路电流  $I = 887 \text{ A}$ ,所以同步电抗的不饱和值为

$$X_s = \frac{E_0}{I} = \frac{4618.8}{887} \Omega = 5.207 \Omega$$

从空载特性上查出对应于额定电压  $U_N$  时的励磁电流  $I_{f0} = 102 \text{ A}$ ,再从短路特性查出对应该励磁电流相应的短路电流  $I' = 887 \text{ A}$ ,所以同步电抗的饱和值为

$$X_{s(\text{饱和})} = \frac{U_{N\phi}}{I'} = \frac{6300/\sqrt{3}}{887} \Omega = 4.1 \Omega$$

额定电流

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{15000}{\sqrt{3} \times 6.3} \text{ A} \approx 1375 \text{ A}$$

同步电抗的标么值

$$X_s^* = \frac{X_s I_N}{U_{N\phi}} = \frac{5.207 \times 1375}{6300/\sqrt{3}} \approx 1.968$$

$$X_{s(\text{饱和})}^* = \frac{X_{s(\text{饱和})} I_N}{U_{N\phi}} = \frac{4.1 \times 1375}{6300/\sqrt{3}} = 1.55$$

在额定负载时,  $U = U_{N\phi} = 6300/\sqrt{3} \text{ V}$ ,  $I = I_N = 1375 \text{ A}$ ,  $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后),  $\varphi_N = 36.87^\circ$ 。

以电压  $\dot{U}$  为参考相量,有

$$\dot{U} = U_{N\phi} \angle 0^\circ = 6300/\sqrt{3} \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I} = I_N \angle -\varphi_N = 1375 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

不计饱和与电枢电阻,隐极发电机的励磁电动势

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}X_s$$

$$= (6300/\sqrt{3} \angle 0^\circ + j1375 \angle -36.87^\circ \times 5.207) \text{ V}$$

$$= 9784.7 \angle 35.83^\circ \text{ V}$$

所求励磁电动势  $E_0 = 9784.7 \text{ V}$ 。

6-10 习题 6-9 的汽轮发电机,除已给数据外,还知波梯电抗  $X_p$  为  $0.42 \Omega$ ,额定电流所产生的电枢磁动势与  $181.5 \text{ A}$  的励磁电流等效,





根据磁动势平衡方程式,有

$$F_t = F + (-k_a F_a)$$

作出磁动势矢量图,如图 6-13 所示,得到励磁磁动势矢量  $F_t$ ,其值就是与之对应的额定励磁电流  $I_{tN}$ ,测得  $I_{tN} = 285\text{A}$ 。

查空载特性曲线,当  $I_t = I_{tN} = 285\text{A}$  时,  $E_0 = 8000/\sqrt{3}\text{V}$ ,则电压调整率

$$\Delta u = \frac{E_0 - U_{N\phi}}{U_{N\phi}} \times 100\% = \frac{8000 - 6300}{6300} \times 100\% = 27\%$$

**6-11** 有一台 25000 kW、10 kV(Y 联结)、 $\cos\varphi = 0.8$ (滞后) 的汽轮发电机,其空载和短路曲线如下表所示。

空载曲线						短路曲线	
$U_L/\text{kV}$	6.2	10.5	12.3	13.46	14.1	$I/\text{A}$	1718
$I_t/\text{A}$	77.5	155	232	310	388	$I_t/\text{A}$	280

已知发电机的波梯电抗  $X_p = 0.432\ \Omega$ ,基本铁耗  $p_{Fe(U=U_N)} = 138\text{ kW}$ ,定子基本铜耗  $p_{Cu875^\circ\text{C}(I=I_N)} = 147\text{ kW}$ ,杂散损耗  $p_\Delta \approx 100\text{ kW}$ ,机械损耗  $p_\Omega = 260\text{ kW}$ ,励磁绕组电阻  $R_{f75^\circ\text{C}} = 0.416\ \Omega$ ,试求发电机的额定励磁电流和额定效率。

**解** 若发电机的励磁电流由另外的直流电源供给,则发电机的总损耗

$$\begin{aligned} \sum p &= p_\Omega + p_{Fe(U=U_N)} + p_\Delta + p_{Cu875^\circ\text{C}(I=I_N)} \\ &= (260 + 138 + 100 + 147)\text{ kW} = 645\text{ kW} \end{aligned}$$

发电机额定负载时输入的机械功率

$$P_{IN} = P_N + \sum p = (25000 + 645)\text{ kW} = 25645\text{ kW}$$

发电机额定效率

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{IN}} \times 100\% = \frac{25000}{25645} \times 100\% = 97.5\%$$

下面用电动势 - 磁动势图求发电机的额定励磁电流。

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_N} = \frac{25000}{\sqrt{3} \times 10 \times 0.8}\text{ A} = 1804.22\text{ A}$$

$$R_{a75^{\circ}\text{C}} = \frac{p_{\text{Cu}a75^{\circ}\text{C}}(I = I_N)}{mI_N^2} = \frac{147000}{3 \times 1804,22^2} \Omega = 0,015 \Omega$$

当  $\cos\varphi_N = 0.8$  (滞后) 时,  $\varphi_N = 36.87^\circ$ 。以电压为参考相量, 在额定负载时,  $\dot{I} = I_N \angle -\varphi_N$ 。

气隙电动势

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{U} + \dot{I}R_{\Sigma} + j\dot{I}X_p \\ &= [10000/\sqrt{3}\angle 0^\circ + 0.015 \times 1804.22\angle -36.87^\circ \\ &\quad + 0.432 \times 1804.22\angle (90^\circ - 36.87^\circ)] \text{ V} \\ &= 6292.2\angle 5.54^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

将相量  $\dot{U}$  取在纵坐标上,作电压相量图,如图 6-14 所示。

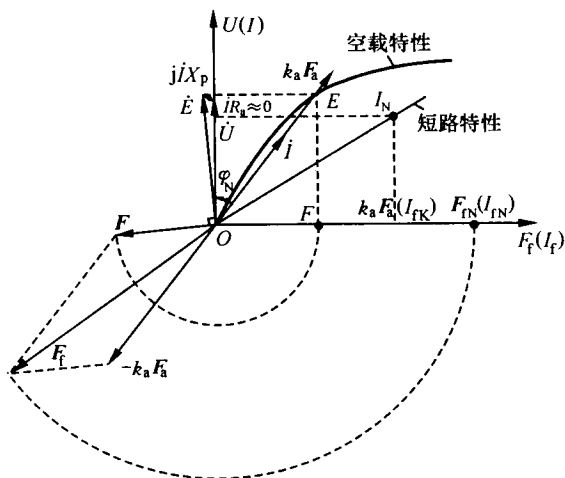


图 6-14 习题 6-11 的电动势 - 磁动势图(波梯图)

从空载特性上查取产生气隙电动势  $E$  所需的合成磁动势  $F$  对应的等效励磁电流, 得  $F(I_f) = 166 \text{ A}$ 。

由短路特性知,当短路电流等于额定值  $1804.22\text{A}$  时,励磁电流

$$I_{\text{нк}} = \frac{280}{1718} \times 1804.22 \text{ A} = 294 \text{ A}$$

$I_{\text{FK}} = 294 \text{ A}$  就是额定电枢电流所产生的电枢磁动势对应的等效励

磁电流。因为发电机短路时,电压  $U = 0$ , 气隙电动势  $E = |\dot{I}R_a + j\dot{I}X_p| \ll U_{N\phi}$ , 所以忽略漏阻抗压降, 认为  $E \approx 0$ , 则此时的合成磁动势  $F \approx 0$ , 电枢等效磁动势  $k_a F_a \approx F_f$ , 额定电流所产生的电枢磁动势与额定短路励磁电流  $I_{fK}$  等效。

根据  $F_f = F + (-k_a F_a)$  作磁动势矢量图, 如图 6-14 所示, 得到励磁磁动势  $F_f$ , 其实是所要求的额定励磁电流  $I_{fN}$ , 经测量,  $I_{fN} = 424 \text{ A}$ 。

**6-12** 试述同步发电机单独负载运行和与电网并联运行时, 性能上有哪些差别, 原因何在?

**答** 当同步发电机单独负载运行时, 随着负载的变化, 同步发电机的频率和端电压将发生相应的变化, 供电的质量和可靠性较差, 而且功率因数  $\cos\varphi$  由负载决定, 当负载性质一定时, 不可调; 当同步发电机与大容量电网并联运行时, 由于电网容量很大, 电网电压  $U$  及频率  $f$  可认为等于常数, 个别负载的变动对整个电网的电压、频率影响很小, 可忽略, 因此供电的质量很高, 另外, 个别发电机发生故障停机, 不会造成整个电网断电, 因此供电可靠性提高, 同步发电机与电网并联运行时, 在一定的有功电流下改变发电机的励磁电流还可以调节发电机的功率因数。

**6-13** 试述同步发电机投入电网并联的条件和方法。

**答** 投入并联的同步发电机应当满足下列条件:

(1) 发电机的相序应与电网一致;

(2) 发电机的频率应与电网一致;

(3) 发电机的励磁电动势  $E_0$  应与电网电压  $\dot{U}$  大小相等、相位相同, 即  $E_0 = \dot{U}$ 。

上述三个条件中, 第一个条件必须满足。

同步发电机投入并联运行的方法有两种: 准确整步法和自整步法。

**准确整步法:** 把发电机调整到完全满足投入并联运行的条件, 然后投入电网, 称为准确整步法。下面以三个采用直接接法的同步指示灯作为同步指示器介绍准确整步法: 为了判断是否满足投入并联条件, 把三个同步指示灯跨接在电网的三相端点 A、B、C 和发电机的对应相 A'、B'、C' 之间, 即接在 A、A', B、B', C、C' 之间; 若三灯轮流亮暗, 则表示发电机与电网相序不同, 应改变发电机的相序; 若三个灯同时呈现出时亮

时暗的现象,则表明发电机与电网频率不同,应调节发电机的转速,直到三个灯的亮度不再闪烁;再调节发电机电压的大小和相位,直到三个灯同时熄灭且  $A'$  与  $A$  间电压表的指示为零时,就表示发电机已经满足投入并联的条件,此时即可合闸投入并联。

自整步法:确保发电机与电网相序相同,然后按照规定的转向把发电机拖动到接近于同步转速,励磁绕组经限流电阻短路;然后把发电机投入电网,再立即加上直流励磁,此时依靠定、转子磁场间所形成的电磁转矩,把转子自动牵入同步。

6-14 试证明考虑电枢电阻时,水轮发电机的功角特性为

$$P_e = m \frac{E_Q}{Z_q} [U \sin(\delta - \alpha_q) + E_Q \sin \alpha_q]$$

式中:  $E_Q = E_0 - I_d(X_d - X_q)$ ;  $Z_q = \sqrt{R_s^2 + X_q^2}$ ;  $\alpha_q = \arcsin(R_s/Z_q)$ 。

证 先画出凸极同步发电机电压相量图,如图 6-15 所示。

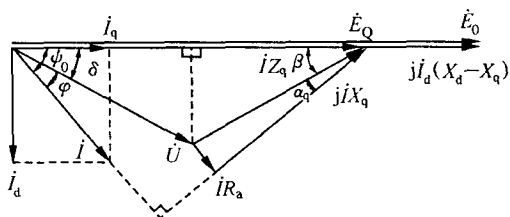


图 6-15 凸极同步发电机电压相量图

图中

$$\beta = 90^\circ - \psi_0 - \alpha_q$$

则

$$\cos \beta = \cos[90^\circ - (\psi_0 + \alpha_q)] = \sin(\psi_0 + \alpha_q)$$

$$= \sin \psi_0 \cos \alpha_q + \cos \psi_0 \sin \alpha_q$$

$$\sin \beta = \sin[90^\circ - (\psi_0 + \alpha_q)] = \cos(\psi_0 + \alpha_q)$$

$$= \cos \psi_0 \cos \alpha_q - \sin \psi_0 \sin \alpha_q$$

电流  $I$  的直轴分量  $I_d$  值为

$$I_d = I \sin \psi_0$$

电流  $I$  的交轴分量  $I_q$  值为

$$I_q = I \cos \psi_0$$

由图 6-15 所示的电压相量图知

$$\begin{aligned} E_Q &= U \cos \delta + I Z_q \cos \beta \\ &= U \cos \delta + I Z_q (\sin \psi_0 \cos \alpha_q + \cos \psi_0 \sin \alpha_q) \\ &= U \cos \delta + I_d Z_q \cos \alpha_q + I_q Z_q \sin \alpha_q \end{aligned}$$

$$E_Q \sin \alpha_q = U \cos \delta \sin \alpha_q + I_d Z_q \sin \alpha_q \cos \alpha_q + I_q Z_q \sin^2 \alpha_q$$

由图 6-15 所示的电压相量图知

$$\begin{aligned} U \sin \delta &= I Z_q \sin \beta \\ &= I Z_q (\cos \psi_0 \cos \alpha_q - \sin \psi_0 \sin \alpha_q) \\ &= I_q Z_q \cos \alpha_q - I_d Z_q \sin \alpha_q \end{aligned}$$

$$U \sin \delta \cos \alpha_q = I_q Z_q \cos^2 \alpha_q - I_d Z_q \sin \alpha_q \cos \alpha_q$$

将此式与上面  $E_Q \sin \alpha_q$  的表达式相加,得

$$\begin{aligned} E_Q \sin \alpha_q + U \sin \delta \cos \alpha_q &= U \cos \delta \sin \alpha_q + I_q Z_q \\ I_q &= \frac{1}{Z_q} [E_Q \sin \alpha_q + U \sin(\delta - \alpha_q)] \end{aligned}$$

同步发电机的电磁功率

$$\begin{aligned} P_e &= m U I \cos \varphi + m I^2 R_s = m E_Q I \cos \psi_0 = m E_Q I_q \\ &= m \frac{E_Q}{Z_q} [E_Q \sin \alpha_q + U \sin(\delta - \alpha_q)] \end{aligned}$$

证毕。

**6-15** 有一台  $X_d^* = 0.8$ ,  $X_q^* = 0.5$  的凸极同步发电机与电网并联运行,已知发电机的端电压和负载为  $U^* = 1$ ,  $I^* = 1$ ,  $\cos \varphi = 0.8$  (滞后),电枢电阻略去不计。试求:

(1)  $E_0^*$ ,  $\delta_N$ ;

(2)  $P_{e(\max)}$  ( $E_0^*$  保持为上面的值)。

**解** 发电机的功率因数  $\cos \varphi = 0.8$  (滞后),则

$$\varphi = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$$

$$\sin \varphi = \sin 36.87^\circ = 0.6$$

已知  $R_s^* = 0$ , 内功率因数角

$$\psi_0 = \arctan \frac{U^* \sin \varphi + I^* X_q^*}{U^* \cos \varphi + I^* R_s^*}$$

$$= \arctan \frac{0.6 + 0.5}{0.8} = 53.97^\circ$$

功率角  $\delta_N = \psi_0 - \varphi = 53.97^\circ - 36.87^\circ = 17.1^\circ$

励磁电动势的标幺值

$$\begin{aligned} E_0^* &= U^* \cos \delta_N + I_d^* X_d^* \\ &= U^* \cos \delta_N + I^* \sin \psi_0 X_d^* \\ &= \cos 17.1^\circ + \sin 53.97^\circ \times 0.8 = 1.603 \end{aligned}$$

根据同步发电机的功角特性,有

$$P_e^* = \frac{E_0^* U^*}{X_d^*} \sin \delta + \frac{1}{2} U^{*2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\delta$$

知 
$$\frac{dP_e^*}{d\delta} = \frac{E_0^* U^*}{X_d^*} \cos \delta + \frac{1}{2} U^{*2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) (2 \cos 2\delta)$$

令 
$$\frac{dP_e^*}{d\delta} = 0$$

则 
$$\frac{E_0^* U^*}{X_d^*} \cos \delta + \frac{1}{2} U^{*2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) 2 \cos 2\delta = 0$$

得知  $P_e^*$  取得极值  $P_{e(\max)}^*$  时的  $\cos \delta_m$  为

$$\begin{aligned} \cos \delta_m &= 0.30477 \text{ (另一根 } -1.64 \text{ 不合理,舍去)} \\ \delta_m &= \arccos 0.30477 = 72.26^\circ \end{aligned}$$

将  $\delta_m$  的数值代入  $P_e^*$  的计算公式,可得

$$\begin{aligned} P_{e(\max)}^* &= \frac{1.603 \times 1}{0.8} \sin 72.26^\circ + \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \sin (2 \times 72.26^\circ) \\ &= 2.126 \end{aligned}$$

### 6-16 试述同步发电机与电网并联时静态稳定的概念。

答 同步发电机与电网并联运行,稳定运行在某一工作点。当外界(电网或原动机)发生微小的扰动,且在扰动消失后,发电机是否能恢复到原先的状态下继续稳定地运行,此问题称为同步发电机的静态稳定问题。若能恢复,则发电机是稳定的;反之,则是不稳定的。

6-17 一台 31250 kVA(Y 联结)、 $\cos \varphi_N = 0.8$ (滞后)的汽轮发电机与无穷大电网并联运行。已知发电机的同步电抗  $X_s = 7.53 \Omega$ ,额定负载时的励磁电动势  $E_0 = 17.2 \text{ kV}$ (相),不计饱和与电枢电阻。试求:

(1) 发电机在额定负载时,端电压  $U$ 、电磁功率  $P_e$ 、功率角  $\delta_N$ 、输出的无功功率  $Q_2$  及过载能力各为多少?

(2) 维持额定励磁不变,减小汽轮机的输出,使发电机输出的有功功率减少一半,问此时的  $P_e$ 、 $\delta$ 、 $\cos\varphi$  及  $Q_2$  将变成多少?

解 (1) 额定负载时,  $I = I_N$ ,  $S = S_N$ ,

$$\text{所以} \quad I = \frac{S_N}{3U_{N\phi}} = \frac{31250000}{3U_{N\phi}}$$

发电机与无穷大电网并联,端电压  $U = U_{N\phi}$ 。

因为  $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后)

$$\text{所以} \quad \varphi_N = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$$

$$\sin\varphi_N = \sin 36.87^\circ = 0.6$$

选励磁电动势  $E_0$  作为参考相量,则

$$\dot{E}_0 = 17200 \angle 0^\circ \text{V}, \quad \dot{U} = U \angle (-\delta)$$

$$\dot{I} = I \angle (-\varphi_0) = \frac{31250000}{3U} \angle [-(\delta + \varphi_N)]$$

根据隐极同步发电机的电压方程式得

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}R_a + j\dot{I}X_s$$

忽略电枢电阻  $R_a$ , 则

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}X_s$$

$$\text{所以} \quad 17200 = U \angle (-\delta) + j \frac{31250000}{3U} \times 7.53 \angle [-(\delta + 36.87^\circ)]$$

$$= U \cos\delta + \frac{78437500}{U} \sin(\delta + 36.87^\circ) - jU \sin\delta$$

$$+ j \frac{78437500}{U} \cos(\delta + 36.87^\circ)$$

等式两边的实部和虚部应对应相等,则有

$$17200 = U \cos\delta + \frac{78437500}{U} \sin(\delta + 36.87^\circ)$$

$$0 = -U \sin\delta + \frac{78437500}{U} \cos(\delta + 36.87^\circ)$$

将两个方程联立求解,得

$$\sin\delta_1 = 0.59607, \delta_1 = 36.59^\circ$$



$$\sin\delta_2 = 0.2847, \delta_2 = 16.54^\circ$$

对于汽轮发电机,  $\delta_N$  约为  $30^\circ \sim 40^\circ$ , 所以  $\delta_2 = 16.54^\circ$  不合理, 舍去, 则

$$\delta_N = \delta_1 = 36.59^\circ$$

$$U = \sqrt{\frac{78437500 \cos(36.59^\circ + 36.87^\circ)}{\sin 36.59^\circ}} \text{ V} \approx 6120 \text{ V}$$

电磁功率

$$\begin{aligned} P_e &= m \frac{UE_0}{X_s} \sin\delta_N \\ &= 3 \times \frac{6120 \times 17200}{7.53} \times \sin 36.59^\circ \text{ W} \\ &= 25000 \times 10^3 \text{ W} \end{aligned}$$

发电机输出的无功功率

$$Q_2 = S_N \sin\varphi_N = 31250 \times 0.6 \text{ kvar} = 18750 \text{ kvar}$$

当  $\delta_m = 90^\circ$  时,  $\sin\delta_m = 1, P_e = P_{e(\max)}$ 。

$$P_{e(\max)} = \frac{mUE_0}{X_s} = \frac{3 \times 6120 \times 17200}{7.53} \text{ W} = 41938 \times 10^3 \text{ W}$$

发电机的过载能力

$$k_P = \frac{P_{e(\max)}}{P_N} = \frac{41938}{31250 \times 0.8} = 1.6775$$

(2) 维持额定励磁不变,  $E_0$  亦不变, 则

$$E_0 = 17200 \text{ V}$$

发电机输出的有功功率减小一半时, 有

$$P_2 = \frac{1}{2} P_N = \frac{1}{2} S_N \cos\varphi_N = \frac{1}{2} \times 31250 \times 0.8 \text{ kW} = 12500 \text{ kW}$$

不计电枢电阻, 则

$$P_e \approx P_2 = 12500 \text{ kW}$$

发电机端电压是电网电压, 保持不变, 即

$$U = 6120 \text{ V}$$

$$\text{电枢电流 } I = \frac{P_2}{3U \cos\varphi} = \frac{12500000}{3 \times 6120 \cos\varphi} = \frac{680.83}{\cos\varphi} \text{ A}$$

$$\text{因为 } \dot{E}_0 = \dot{U} + jIX_s$$

所以  $17200 = 6120 \angle (-\delta) + j \frac{680.83}{\cos\varphi} \angle [-(\delta + \varphi)] \times 7.53$

对方程分析、求解,得

$$\varphi = 63.7^\circ, \cos\varphi = 0.443$$

此时发电机输出的无功功率

$$Q_2 = P_2 \tan\varphi = 12500 \times \tan 63.7^\circ \text{ kvar} \approx 25292 \text{ kvar}$$

**6-18** 习题 6-17 中,若维持发电机的有功功率为额定负载时的有功功率不变,减小发电机的励磁,使  $E_0 = 13 \text{ kV}$ ,试求此时发电机的  $\delta$ ,  $\cos\varphi$  和  $Q_2$  各为多少?

解 由题意知  $P_2 = P_N = 25000 \text{ kW}$ ,电枢电流

$$I = \frac{P_2}{3U\cos\varphi} = \frac{25000 \times 10^3}{3 \times 6120 \cos\varphi} = \frac{1361.66}{\cos\varphi} \text{ A}$$

励磁电动势和电压为

$$\dot{E}_0 = 13000 \angle 0^\circ \text{ V}, \quad \dot{U} = 6120 \angle (-\delta) \text{ V}$$

由发电机的电压方程

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jIX_s$$

得  $13000 = (6120\cos\delta - j6120\sin\delta) + j \frac{1361.66 \times 7.53}{\cos\varphi} \angle [-(\delta + \varphi)]$

对方程进行求解,可得

$$\delta = 52.07^\circ, \quad \cos\varphi = 0.984$$

此时发电机输出无功功率

$$Q_2 = P_2 \tan\varphi = 25000 \tan(\arccos 0.984) \text{ kvar} \approx 4527 \text{ kvar}$$

**6-19** 两台相同的汽轮发电机并联运行,共同供电给一个  $40000 \text{ kW}$ 、 $\cos\varphi = 0.85$ (滞后)的感性负载。已知发电机的额定容量为  $30000 \text{ kVA}$ ,额定电压  $U_N = 13.8 \text{ kV}$ (Y联结),同步电抗  $X_s^* = 0.98$ 。原先每台发电机各负担一半负载,端电压为额定电压,且功率因数均为  $0.85$ (滞后),今调节两机的励磁,使  $E_{0(1)} = 14.5 \text{ kV}$ ,假定负载和端电压保持不变,试求每台发电机的:

(1) 视在、有功和无功功率,电枢电流和功率因数;

(2) 励磁电动势和功率角。

解 (1) 求解视在、有功和无功功率。调节两台发电机的励磁之前,

输出给负载的总无功功率

$$\begin{aligned} Q_L &= P_L \tan \varphi = P_L \tan(\arccos 0.85) \\ &= 40000 \times \tan 31.79^\circ \text{ kvar} \approx 24790 \text{ kvar} \end{aligned}$$

第一台发电机输出的有功功率

$$P_{\text{I前}} = \frac{1}{2} P_L = \frac{1}{2} \times 40000 \text{ kW} = 20000 \text{ kW}$$

电枢电流

$$I_{\text{I前}} = \frac{P_{\text{I前}}}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 13.8 \times 0.85} \text{ A} \approx 984.4 \text{ A}$$

内功率因数角

$$\psi_{0\text{I前}} = \arctan \frac{U \sin \varphi + I X_s}{U \cos \varphi + I R_s} = \arctan \frac{U^* \sin \varphi + I^* X_s}{U^* \cos \varphi + I^* R_s}$$

式中:  $U^* = 1$ ,  $\sin \varphi = \sin(\arccos 0.85) = \sin 31.79^\circ = 0.5268$ 。发电机的额定电流

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N} = \frac{30000}{\sqrt{3} \times 13.8} \text{ A} = 1255.1 \text{ A}$$

$$I_{\text{I前}}^* = \frac{I_{\text{I前}}}{I_N} = \frac{984.4}{1255.1} = 0.78432$$

$$\psi_{0\text{I前}} = \arctan \frac{0.5268 + 0.78432 \times 0.98}{0.85} = 56.7287^\circ$$

$$\text{功率角 } \delta_{\text{I前}} = \psi_{0\text{I前}} - \varphi = 56.7287^\circ - 31.79^\circ = 24.94^\circ$$

励磁电动势

$$\begin{aligned} E_{0\text{I前}}^* &= U^* \cos \delta_{\text{I前}} + I_{\text{I前}}^* \sin \psi_{0\text{I前}} X_s^* \\ &= \cos 24.94^\circ + 0.78432 \times 0.98 \times \sin 56.7287^\circ \\ &= 1.5494 \end{aligned}$$

调节两台发电机的励磁之后, 每台发电机承担的有功负载不变, 则

$$P_1 = P_{\text{II}} = \frac{1}{2} P_L = 20000 \text{ kW}$$

因为

$$P_2 = P_e - m I^2 R_s$$

当忽略电枢电阻  $R_s$  时, 有

$$P_2 \approx P_e = m \frac{U E_0}{X_s} \sin \delta$$

因为发电机端电压  $U$  不变, 所以调磁前后若电磁功率  $P_e$  不变, 则

$$E_0 \sin \delta = \text{常值}, \quad I \cos \varphi = \text{常值}$$

即

$$E_{0\text{前}} \sin \delta_{\text{前}} = E_0 \sin \delta$$

所以

$$\begin{aligned} \sin \delta_1 &= \frac{E_{01\text{前}} \sin \delta_{\text{前}}}{E_{01}} = \frac{E_{01\text{前}}}{E_{01}} \sin \delta_{\text{前}} \\ &= \frac{1.5494}{14.5\sqrt{3}/13.8} \times \sin 24.94^\circ = 0.359 \\ \delta_1 &= 21.04^\circ \end{aligned}$$

因为

$$E_{01}^* = U^* \cos \delta_1 + I^* X_s^* \sin \psi_{01}$$

$$\text{所以} \quad \frac{14.5\sqrt{3}}{13.8} = \cos 21.04^\circ + \frac{I_{1\text{前}}^* \cos \varphi_{\text{前}}}{\cos \varphi_1} \sin(\varphi_1 + 21.04^\circ)$$

其中

$$I_{1\text{前}}^* = 0.78432, \cos \varphi_{\text{前}} = 0.85$$

将  $I_{1\text{前}}^*$  和  $\cos \varphi_{\text{前}}$  的值代入方程, 可求得

$$\cos \varphi_1 = 0.683, \quad \varphi_1 = \arccos(0.683) = 46.92^\circ$$

第一台发电机输出的无功功率

$$Q_1 = P_1 \tan \varphi_1 = 20000 \tan 46.92^\circ \text{ kvar} \approx 21387 \text{ kvar}$$

第一台发电机的视在功率

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} = \frac{20000}{0.683} \text{ kVA} \approx 29283 \text{ kVA}$$

第一台发电机的电枢电流

$$I_1 = I_N I_1^* = 1255.1 \times \frac{0.78432 \times 0.85}{0.683} \text{ A} = 1225.1 \text{ A}$$

第二台发电机输出的有功功率  $P_{\text{II}} = P_1 = 20000 \text{ kW}$

调磁后两台发电机向负载输出的总无功功率  $Q_L$  不变, 即

$$Q_1 + Q_{\text{II}} = Q_L$$

$$\text{则} \quad Q_{\text{II}} = Q_L - Q_1 = (24790 - 21385) \text{ kvar} = 3405 \text{ kvar}$$

因为

$$\tan \varphi = \frac{Q_2}{P_2}$$

所以

$$\tan \varphi_{\text{II}} = \frac{Q_{\text{II}}}{P_{\text{II}}} = \frac{3405}{20000} = 0.17024$$

$$\varphi_{\text{II}} = 9.66^\circ, \quad \cos \varphi_{\text{II}} = 0.986$$

第二台发电机的视在功率

$$S_{II} = P_{II} / \cos\varphi_{II} = \frac{20000}{0.986} \text{ kVA} = 20284 \text{ kVA}$$

第二台发电机的电枢电流

$$I_{II} = \frac{P_{II}}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_{II}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 13.8 \times 0.986} \text{ A} = 848.8 \text{ A}$$

(2) 求解励磁电动势和功率角。

$$E_{0I} = 14.5 \text{ kV}, \quad \delta_I = 21.04^\circ$$

因为

$$\phi_{0II} = \arctan \frac{U^* \sin\varphi_{II} + I_{II}^* X_s^*}{U^* \cos\varphi_{II}}$$

其中

$$I_{II}^* = \frac{I_{II}}{I_N} = \frac{848.8}{1255.1} = 0.67628$$

$$\text{所以} \quad \phi_{0II} = \arctan \frac{\sin 9.66^\circ + 0.67628 \times 0.98}{0.986} = 40.11^\circ$$

$$\delta_{II} = \phi_{0II} - \varphi_{II} = 40.11^\circ - 9.66^\circ = 30.45^\circ$$

$$\begin{aligned} E_{0II}^* &= U^* \cos\delta_{II} + I_{II}^* X_s^* \sin\phi_{0II} \\ &= \cos 30.45^\circ + 0.67628 \times 0.98 \times \sin 40.11^\circ \\ &= 1.289 \end{aligned}$$

$$E_{0II} = E_{0II}^* U_{N\Phi} = 1.289 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 10.27 \text{ kV}$$

**6-20** 试述同步电机作为发电机和电动机运行时,  $\varphi$ 、 $\phi_0$  和  $\delta$  角的变化。

**答** 同步发电机和同步电动机是同步电机的两种运行方式, 当同步电机接在电网上时, 电机既可以向电网输出有功功率, 又可以由电网输入有功功率。当电机向电网输出有功功率时, 电机作为发电机运行, 此时电机从轴上输入机械功率, 然后转换成电功率, 这部分电磁功率是由转子传向定子, 然后从出线端输出给电网; 按照发电机惯例, 此时输出功率  $P_2$  与电磁功率  $P_e$  均为正值, 因为  $P_2 = mUI \cos\varphi$ , 若想  $P_2 > 0$ , 必须  $\cos\varphi > 0$ , 则  $|\varphi| < 90^\circ$ , 即  $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$ ; 电磁功率  $P_e = m \frac{UE_0}{X_d} \sin\delta + m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$ , 所以若要  $P_e > 0$ , 必须  $\sin\delta > 0$ , 即

$0^\circ < \delta < 180^\circ$ 。此时励磁电动势  $\dot{E}_0$  超前电压  $\dot{U}$ , 内功率因数角  $\psi_0$  是励磁电动势  $\dot{E}_0$  与电枢电流的相角差,  $\psi_0 = \delta + \varphi$ , 所以发电机状态下  $-90^\circ < \psi_0 < 90^\circ$ 。当同步电机由电网输入电功率, 轴端输出机械功率时, 若仍用发电机惯例来分析, 同步电机向电网发出负的电功率, 此时  $P_2 < 0$ , 所以  $\cos\varphi < 0$ ,  $|\varphi| > 90^\circ$ ; 此时转子与定子之间电磁功率传递方向与发电机状态时相反, 所以  $P_e < 0$ , 则  $\sin\delta < 0$ ,  $-180^\circ < \delta < 0^\circ$ , 此时励磁电动势  $\dot{E}_0$  滞后电压  $\dot{U}$ , 内功率因数角  $|\psi_0| > 90^\circ$ 。

**6-21** 已知一台三相凸极同步电动机的电压为  $U$ , 电枢电流为  $I_M$ , 功率因数角为  $\varphi_M$ , 试证明电动机的功率角  $\delta_M$  为

$$\tan\delta_M = \frac{I_M X_q \cos\varphi_M + I_M R_a \sin\varphi_M}{U + I_M X_q \sin\varphi_M - I_M R_a \cos\varphi_M}$$

当  $I_M$  超前于  $\dot{U}$  时,  $\varphi_M$  取为正值。

**证** 采用电动机惯例时, 凸极同步电动机的电压方程为

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_M R_a + j\dot{I}_{dM} X_d + j\dot{I}_{qM} X_q$$

相应的电压相量图如图 6-16 所示。

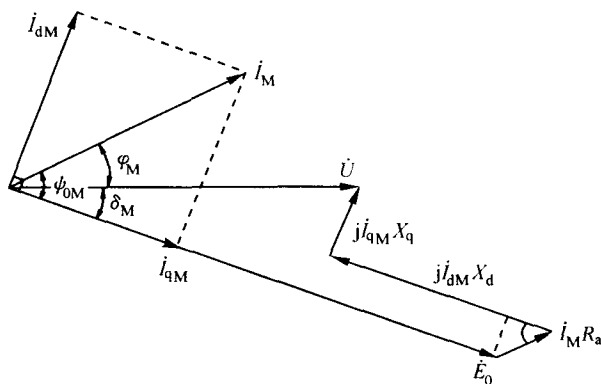


图 6-16 凸极同步电动机电压相量图

从相量图上可看出  $U \sin\delta_M = I_{qM} X_q + I_M R_a \sin\psi_{0M}$

$I_{dM}$  和  $I_{qM}$  分别为电枢电流  $I_M$  的直轴和交轴分量, 而

$$I_{dM} = I_M \sin\psi_{0M}, I_{qM} = I_M \cos\psi_{0M}$$

所以

$$U \sin\delta_M = I_M X_q \cos\psi_{0M} + I_M R_a \sin\psi_{0M}$$

采用电动机惯例,当  $I_M$  超前  $E_0$  时,  $\psi_{0M}$  为正;当  $I_M$  超前  $U$  时,  $\varphi_M$  为正, 则

$$\psi_{0M} = \varphi_M + \delta_M$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } U \sin \delta_M &= I_M X_q \cos \varphi (\varphi_M + \delta_M) + I_M R_s \sin (\varphi_M + \delta_M) \\ &= I_M X_q \cos \varphi_M \cos \delta_M - I_M X_q \sin \varphi_M \sin \delta_M \\ &\quad + I_M R_s \sin \varphi_M \cos \delta_M + I_M R_s \cos \varphi_M \sin \delta_M \end{aligned}$$

等式两边同除以  $\sin \delta_M$ , 则

$$\begin{aligned} U &= I_M X_q \cos \varphi_M \frac{1}{\tan \delta_M} - I_M X_q \sin \varphi_M + I_M R_s \sin \varphi_M \frac{1}{\tan \delta_M} \\ &\quad + I_M R_s \cos \varphi_M \end{aligned}$$

$$\text{则 } \tan \delta_M = \frac{I_M X_q \cos \varphi_M + I_M R_s \sin \varphi_M}{U + I_M X_q \sin \varphi_M - I_M R_s \cos \varphi_M}$$

证毕。

6-22 有一台三相同步电动机接到电网;已知  $U_N = 6 \text{ kV}$  (Y 联结),  $n_N = 300 \text{ r/min}$ ,  $I_N = 57.8 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi_N = 0.8$  (超前),  $X_d = 64.2 \Omega$ ,  $X_q = 40.8 \Omega$ , 电枢电阻忽略不计。试求:

- (1) 额定负载时电动机的励磁电动势、功率角、电磁功率和电磁转矩;
- (2) 若负载转矩保持为额定值不变, 调节励磁使  $\cos \varphi_M = 1$ , 问此时的励磁电动势、功率角将变成多少?

解 (1) 计算额定负载时的  $E_0$ 、 $\delta_M$ 、 $P_e$  及  $T_e$ 。

额定负载时,  $I_M = I_N = 57.8 \text{ A}$ ,  $U = U_N = 6 \text{ kV}$ 。

已知  $\cos \varphi_N = 0.8$  (超前), 则  $\varphi_N = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$

$$\sin \varphi_N = \sin 36.87^\circ = 0.6$$

根据内功率因数角  $\psi_{0M}$  的计算式

$$\psi_{0M} = \arctan \frac{U \sin \varphi_M + I_M X_q}{U \cos \varphi_M - I_M R_s}$$

求  $\psi_{0M}$ , 题中已知  $R_s = 0$ , 则有

$$\begin{aligned} \psi_{0M} &= \arctan \frac{U \sin \varphi_M + I_M X_q}{U \cos \varphi_M} \\ &= \arctan \frac{\frac{6000}{\sqrt{3}} \times 0.6 + 57.8 \times 40.8}{\frac{6000}{\sqrt{3}} \times 0.8} = 58.01^\circ \end{aligned}$$

功率角

$$\delta_M = \psi_{0M} - \varphi_M = 58.01^\circ - 36.87^\circ = 21.14^\circ$$

忽略电阻  $R_a$  时, 电动机的电压方程为

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + j\dot{I}_{dM}X_d + j\dot{I}_{qM}X_q$$

选  $\dot{E}_0$  作为参考相量, 则

$$\dot{E}_0 = E_0 \angle 0^\circ = E_0$$

$$\dot{U} = U_{N\frac{1}{\sqrt{3}}} \angle \delta_M = \frac{6000}{\sqrt{3}} (\cos 21.14^\circ + j \sin 21.14^\circ) \text{ V}$$

$$= (3231 + j1249.32) \text{ V}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_M &= I_N \angle \psi_{0M} = (57.8 \cos 58.01^\circ + j 57.8 \sin 58.01^\circ) \text{ A} \\ &= (30.62 + j49) \text{ A} \end{aligned}$$

将  $\dot{E}_0$ 、 $\dot{U}$  和  $\dot{I}_M$  代入电压方程

$$3231 + j1249.32 = E_0 + jI_M X_d \sin \psi_{0M} + jI_M X_q \cos \psi_{0M}$$

$I_{dM}$  超前  $\dot{E}_0$  电角度  $90^\circ$ ,  $jI_{dM}X_d$  超前  $\dot{E}_0$  电角度  $180^\circ$ , 因此

$$jI_{dM}X_d = -I_{dM}X_d = -I_M X_d \sin \psi_{0M} = -49 \times 64.2 \text{ V} = -3145.8 \text{ V}$$

$I_{qM}$  与  $\dot{E}_0$  同相位,  $jI_{qM}X_q$  超前  $\dot{E}_0$  电角度  $90^\circ$ , 因此

$$jI_{qM}X_q = jI_M X_q \cos \psi_{0M} = j30.62 \times 40.8 \text{ V} = j1249.3 \text{ V}$$

$$\dot{E}_0 = E_0 = U \cos \delta_M + I_{dM}X_d$$

$$= (3231 + 3145.8) \text{ V}$$

$$= 6377 \text{ V}$$

所求励磁电动势  $E_0 = 6377 \text{ V}$ 。

$$P_e = m \frac{UE_0}{X_d} \sin \delta_M + m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_M$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } P_e &= \left[ 3 \times \frac{6377 \times 6000 / \sqrt{3}}{64.2} \times \sin 21.14^\circ + 3 \times \frac{1}{2} \times \left( \frac{6000}{\sqrt{3}} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. \times \left( \frac{1}{40.8} - \frac{1}{64.2} \right) \sin 42.28^\circ \right] \text{ kW} \\ &= 480.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

所求电磁功率  $P_e = 480.5 \text{ kW}$ 。

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{60P_e}{2\pi n_N} = \frac{60 \times 480.5 \times 10^3}{2\pi \times 300} \text{ N} \cdot \text{m} = 15295 \text{ N} \cdot \text{m}$$



所求电磁转矩  $T_e = 15295 \text{ N} \cdot \text{m}$

(2) 若负载转矩保持不变,  $T_e = 15295 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 与电磁转矩对应的电磁功率  $P_e$  也不变, 则

$$P_e = 480.5 \text{ kW}$$

忽略电枢电阻, 即有

$$P_2 \approx P_e$$

所以  $P_2 = mUI_M \cos\varphi_M \approx P_e$  不变。

因为电网电压恒定不变, 即

$$I_M \cos\varphi_M = I_N \cos\varphi_N$$

$$\text{所以 } I_M = \frac{I_N \cos\varphi_N}{\cos\varphi_M} = \frac{57.8 \times 0.8}{1} \text{ A} = 46.24 \text{ A}$$

因为  $\cos\varphi_M = 1$ ,  $\sin\varphi_M = 0$

所以  $\varphi_M = 0^\circ$ ,  $\psi_{0M} = \varphi_M + \delta_M = \delta_M$

$$\begin{aligned} \delta_M &= \psi_{0M} = \arctan \frac{U \sin\varphi_M + I_M X_q}{U \cos\varphi_M} \\ &= \arctan \frac{46.24 \times 40.8}{6000/\sqrt{3}} = 28.57^\circ \end{aligned}$$

功率因数  $\cos\varphi_M = 1$  时的功率角  $\delta_M = 28.57^\circ$ 。

$$\begin{aligned} E_0 &= U \cos\delta_M + I_{dM} X_d = U \cos\delta_M + I_M X_d \sin\psi_{0M} \\ &= \left( \frac{6000}{\sqrt{3}} \times \cos 28.57^\circ + 46.24 \times 64.2 \times \sin 28.57^\circ \right) \text{ V} \\ &= 4462 \text{ V} \end{aligned}$$

此时的励磁电动势  $E_0 = 4462 \text{ V}$ 。

**6-23** 有一台三相 Y 联结 50 Hz 的同步电动机,  $P_N = 1000 \text{ kW}$ ,  $U_N = 3 \text{ kV}$ ,  $I_N = 221.4 \text{ A}$ ,  $\cos\varphi_N = 0.9$  (超前),  $2p = 6$ 。已知电动机的参数为  $X_d^* = 1.0887$ ,  $X_q^* = 0.6321$ , 定子电阻忽略不计, 空载转矩  $T_0 = 173.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。试求:

(1) 额定负载时电动机的励磁电动势  $E_0^*$ , 内功率因数角  $\psi_{0M}$  和功率角  $\delta_M$ , 并画出电压相量图;

(2) 励磁电动势  $E_0^*$  保持不变, 电动机空载时, 定子的空载电流  $I_{0M}^*$  和功率角  $\delta_{0M}$ 。

解 (1) 计算额定负载时的  $E_0^*$ 、 $\delta_M$  和  $\psi_{0M}$ 。已知功率因数  $\cos\varphi_N = 0.9$ , 超前, 则

$$\varphi_N = \arccos 0.9 = 25.842^\circ$$

$$\sin\varphi_N = \sin 25.842^\circ = 0.4359$$

忽略电枢电阻  $R_a$ , 内功率因数角

$$\psi_{0M} = \arctan \frac{U^* \sin\varphi_M + I_M^* X_q^*}{U^* \cos\varphi_M}$$

在额定负载下,  $U^* = 1$ ,  $I_M^* = 1$ , 故

$$\psi_{0M} = \arctan \frac{0.4359 + 0.6321}{0.9} = 49.879^\circ$$

功率角

$$\begin{aligned} \delta_M &= \psi_{0M} - \varphi_M = \psi_{0M} - \varphi_N \\ &= 49.879^\circ - 25.842^\circ = 24.037^\circ \end{aligned}$$

励磁电动势

$$\begin{aligned} E_0^* &= U^* \cos\delta_M + I_{dM}^* X_d^* = U^* \cos\delta_M + I_M^* X_d^* \sin\psi_{0M} \\ &= \cos 24.037^\circ + 1.0887 \times \sin 49.879^\circ = 1.7458 \end{aligned}$$

电压相量图如图 6-17 所示。

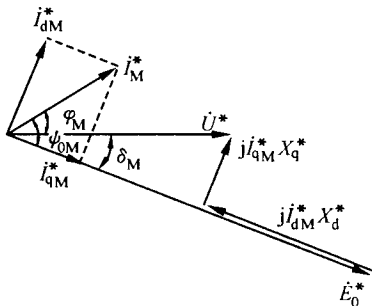


图 6-17 习题 6-23 的电压相量图

(2) 计算空载时的定子电流  $I_{0M}^*$  和功率角  $\delta_{0M}$ 。励磁电动势  $E_0^*$  保持不变, 电动机电压亦不变

$$E_0^* = 1.7458, \quad U^* = 1$$

额定转矩

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_s} = \frac{1000000}{\frac{2\pi \times 50}{3}} \text{ N} \cdot \text{m} = 9549.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

已知空载转矩

$$T_{0M} = 173.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

那么,额定电磁转矩

$$T_{eN} = T_N + T_{0M} = (9549.3 + 173.8) \text{ N} \cdot \text{m} = 9723.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

根据电动机的功角特性,有

$$P_{eN} = m \frac{E_0 U_{N\phi}}{X_d} \sin \delta_M + \frac{m}{2} U_{N\phi}^2 \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_M$$

$$P_{0M} = m \frac{E_0 U_{N\phi}}{X_d} \sin \delta_{0M} + \frac{m}{2} U_{N\phi}^2 \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_{0M}$$

$$\text{则} \quad \frac{P_{0M}}{P_{eN}} = \frac{T_{0M} \Omega}{T_{eN} \Omega} = \frac{E_0^* \sin \delta_{0M} + \frac{1}{2} \left( \frac{X_d^*}{X_q^*} - 1 \right) \sin 2\delta_{0M}}{E_0^* \sin \delta_M + \frac{1}{2} \left( \frac{X_d^*}{X_q^*} - 1 \right) \sin 2\delta_M}$$

将  $T_{0M} = 173.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,  $T_{eN} = 9723.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,  $E_0^* = 1.7458$ ,  $\delta_M = 24.037^\circ$ ,  $X_d^* = 1.0887$  和  $X_q^* = 0.6321$  代入上述比例式,可得

$$\delta_{0M} \approx 0.98^\circ$$

由图 6-17 所示的相量图知

$$U^* \sin \delta_{0M} = (I_{0M}^* \cos \psi_{0M}) X_q^*$$

$$E_0^* = U^* \cos \delta_{0M} + (I_{0M}^* \sin \psi_{0M}) X_d^*$$

$$\text{即} \quad \sin 0.98^\circ = (I_{0M}^* \cos \psi_{0M}) \times 0.6321$$

$$1.7458 = \cos 0.98^\circ + (I_{0M}^* \sin \psi_{0M}) \times 1.0887$$

两个方程联立求解,得

$$I_{0M}^* = 0.6857$$

**6-24** 有一台同步电动机在额定电压、额定频率、额定负载下(功率因数为超前)运行时,功率角  $\delta_M = 25^\circ$ 。现因电网发生故障,电网频率下降 5%,负载转矩不变。问功率角有何变化(设励磁一直保持不变,电枢电阻、凸极和饱和效应均忽略不计)。

解 电动机的转子角速度

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

电网故障后,电网频率  $f' = (1 - 5\%)f = 0.95f$ , 所以故障发生后电动机的角速度

$$\Omega'_s = \frac{2\pi f'}{p} = \frac{2\pi f}{p} \times 0.95 = 0.95\Omega_s$$

式中:  $\Omega_s$  为故障前转子的角速度。

由同步电动机的功角特性,分别求故障前后的电磁功率  $P_e$  和  $P'_e$  为

$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta_M + m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_M$$

$$P'_e = m \frac{E'_0 U}{X_d} \sin \delta'_M + m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta'_M$$

因为励磁保持不变,则

$$E'_0 = E_0$$

不考虑凸极和磁饱和效应时,有

$$X_d = X_q = X_s$$

则

$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta_M$$

$$P'_e = m \frac{E'_0 U}{X_d} \sin \delta'_M$$

因为

$$P_e = T_e \Omega_s, \quad P'_e = T'_e \Omega'_s$$

所以

$$\frac{P'_e}{P_e} = \frac{T'_e \Omega'_s}{T_e \Omega_s} = \frac{\sin \delta'_M}{\sin \delta_M}$$

已知故障前后负载转矩不变,忽略空载转矩的变化,则

$$T'_e = T_e$$

所以

$$\frac{\Omega'_s}{\Omega_s} = \frac{\sin \delta'_M}{\sin \delta_M}$$

$$\sin \delta'_M = \frac{\Omega'_s}{\Omega_s} \sin \delta_M = \frac{0.95\Omega_s}{\Omega_s} \sin 25^\circ = 0.401487$$

故障后的功率角

$$\delta'_M = \arcsin 0.401487 = 23.67^\circ$$

经计算得知,电网故障后功率角减小,降为  $23.67^\circ$ 。

6-25 有一台同步电动机接到无穷大电网,电动机在额定电压下运行,已知电动机的同步电抗  $X_d^* = 0.8, X_q^* = 0.5$ ,定子电阻忽略不计,定子电流为额定电流时功率角  $\delta_N = 25^\circ$ 。试求:

- (1) 此时的  $E_0^*, P_e^*$  和  $\cos\varphi_N$ ;
- (2) 该  $E_0^*$  下电动机的最大电磁功率  $P_{e(\max)}^*$ ;
- (3) 在电磁转矩为第(1)项的值时,电动机能保持同步运行的最低  $E_0^*$ ;
- (4) 转子失去励磁时电动机的最大电磁功率标么值。

解 (1) 电动机接到无穷大电网上时,有

$$U = U_N = \text{定值}, \quad f = f_N = \text{定值}$$

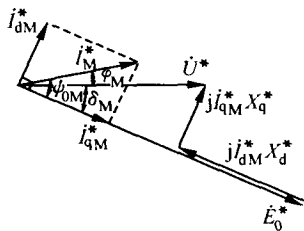


图 6-18 习题 6-25 的电压相量图

忽略定子电阻  $R_s$  时,电压相量图如图 6-18 所示。由相量图知:

$$E_0^* = U^* \cos\delta_M + I_{dM}^* X_d^*$$

$$U^* \sin\delta_M = I_{qM}^* X_q^*$$

式中:定子电流的直轴分量  $I_{dM}^*$  和交轴分量  $I_{qM}^*$  分别为  $I_{dM}^* = I_M^* \sin\psi_{0M}$ ,  $I_{qM}^* = I_M^* \cos\psi_{0M}$ 。

因为  $I_M = I_N$ , 所以  $I_M^* = 1$ , 则

$$E_0^* = \cos 25^\circ + (\sin\psi_{0M}) \times 0.8$$

$$\sin 25^\circ = (\cos\psi_{0M}) \times 0.5$$

将两个方程联立求解,可得

$$\cos\psi_{0M} = \frac{\sin 25^\circ}{0.5} = 0.845237$$

内功率因数角  $\psi_{0M} = \arccos 0.845237 = 32.3027^\circ$

励磁电动势

$$E_0^* = \cos 25^\circ + \sin 32.3027^\circ \times 0.8 \approx 1.334$$

功率因数角

$$\varphi_N = \psi_{0M} - \delta_M = 32.3027^\circ - 25^\circ \approx 7.3^\circ$$

功率因数

$$\cos \varphi_N = \cos 7.3^\circ = 0.992$$

电磁功率  $P_e^*$  可据功角特性求得

$$\begin{aligned} P_e^* &= \frac{U^* E_0^*}{X_d^*} \sin \delta_M + \frac{1}{2} U^{*2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\delta_M \\ &= \frac{1.334}{0.8} \times \sin 25^\circ + \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \sin 50^\circ = 0.992 \end{aligned}$$

(2)  $E_0^* = 1.334$  时的最大电磁功率  $P_{e(\max)}^*$ 。当  $\frac{dP_e^*}{d\delta_M} = 0$  时, 所求得  
的  $\delta_{MM}$  对应最大电磁功率  $P_{e(\max)}^*$ 。

$$\frac{dP_e^*}{d\delta_M} = \frac{1.334}{0.8} \cos \delta_{MM} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) 2 \cos 2\delta_{MM} = 0$$

解得

$$\delta_{MM} = 69.9^\circ, \quad \sin \delta_{MM} = 0.939$$

将  $\delta_{MM}$  的值代入  $P_e^*$  的公式, 可求得

$$\begin{aligned} P_{e(\max)}^* &= \frac{1.334}{0.8} \times \sin 69.9^\circ + \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \times \sin(2 \times 69.9^\circ) \\ &= 1.808 \end{aligned}$$

(3)  $T_e$  保持(1)的值, 保持同步运行, 即转子转速不变, 则

$$P_e^* = T_e^* \Omega_s^* = P_{e(1)}^* = 0.992$$

根据功角特性方程有

$$\begin{aligned} P_e^* &= 0.992 = \frac{E_0^*}{X_d^*} \sin \delta_M + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\delta_M \\ &= \frac{E_0^*}{0.8} \sin \delta_M + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \sin 2\delta_M \end{aligned}$$

$$\text{令} \quad \frac{dE_0^*}{d\delta} = 0, E_0^* = \frac{0.7936 - 0.3 \sin 2\delta_M}{\sin \delta_M}$$

$$\text{有} \quad \frac{dE_0^*}{d\delta} = \frac{-0.6 \cos 2\delta_M \sin \delta_M - \cos \delta_M (0.7936 - 0.3 \sin 2\delta_M)}{\sin^2 \delta_M} = 0$$

则  $\sin\delta_M = 0.8686, \delta_M = 60.3^\circ$

当  $\delta_M = 60.3^\circ$  时,  $E_0^*$  的值最低。最低  $E_0^*$  的值为

$$E_0^* = \frac{0.7936 - 0.3\sin(2 \times 60.3^\circ)}{\sin 60.3^\circ} = 0.616$$

(4) 转子失去励磁求  $P_{e(\max)}^*$ 。转子失磁后,  $E_0^* = 0, U^*$  仍为 1, 电磁功率标么值

$$P_e^* = \frac{0 \times 1}{X_d^*} \sin\delta_M + \frac{1}{2} \times 1^2 \times \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\delta_M$$

即 
$$P_e^* = \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \times \frac{1}{2} \sin 2\delta_M$$

当  $\delta_M = 45^\circ$  时,  $\sin 2\delta_M = 1, P_e^*$  达到最大值, 所求  $P_e^*$  的最大值为

$$P_{e(\max)}^* = \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) = 0.375$$

**6-26** 某工厂电力设备的总功率为 4500 kW,  $\cos\varphi = 0.7$  (滞后)。由于生产发展, 欲新添一台 1000 kW 的同步电动机, 并使工厂的总功率因数提高到 0.8 (滞后), 问此电动机的容量及功率因数应为多少 (电动机的损耗略去不计)?

**解** 1000 kW 的同步电动机投入运行前, 电网的总负载为

有功功率  $P_L = 4500 \text{ kW}$

当  $\cos\varphi = 0.7$  (滞后) 时, 以  $\dot{I}$  滞后  $\dot{U}$  时的  $\varphi$  为正, 则  $\varphi = 45.573^\circ$ 。

无功功率  $Q_L = P_L \tan\varphi = 4500 \tan 45.573^\circ \text{ kvar} = 4590.92 \text{ kvar}$

1000 kW 的同步电动机投入运行后, 电网的总负载为

有功功率  $P'_L = (4500 + 1000) \text{ kW} = 5500 \text{ kW}$

此时功率因数  $\cos\varphi' = 0.8$  (滞后), 则  $\varphi' = 36.87^\circ$ 。

无功功率  $Q'_L = P'_L \tan\varphi' = 5500 \tan 36.87^\circ \text{ kvar} = 4125 \text{ kvar}$ , 忽略损耗, 输入 1000 kW 同步电动机的有功功率

$$P_{IN} \approx P_N = 1000 \text{ kW}$$

输入 1000 kW 同步电动机的无功功率

$$Q_{IN} = Q'_L - Q_L = (4125 - 4590.92) \text{ kvar} = -465.92 \text{ kvar}$$

数据前的负号表明, 输入 1000 kW 同步电动机的无功功率为负, 即实际输出了 465.92 kvar 的无功功率, 那么

$$\tan \varphi_M = \frac{Q_{IN}}{P_{IN}} = \frac{-465.92}{1000} = -0.4652$$

功率因数角

$$\varphi_M = \arctan(-0.4652) = -24.98^\circ$$

因为  $\varphi_M < 0$ , 说明电流  $I_M$  超前电压  $U$ 。

功率因数

$$\cos \varphi_M = \cos(-24.98^\circ) \approx 0.9064$$

电动机的容量

$$S_N = \frac{P_N}{\cos \varphi_M} = \frac{1000}{0.9064} \text{ kVA} \approx 1103 \text{ kVA}$$

**6-27** 有一台三相凸极同步电动机, 其端电压为  $U$ , 由于某种原因失去了励磁, 试求失磁后电动机能带的极限负载(标么值), 此时的电枢电流(标么值)和功率因数三者的表达式(电枢电阻忽略不计)。

**解** 电动机主极失磁前后, 其端电压不变, 所以  $U^* = 1$ , 失磁后,  $I_f = 0$ , 所以  $E_o^* = 0$ 。根据功角特性方程, 有

$$\begin{aligned} P_e^* &= \frac{U^* E_o^*}{X_d^*} \sin \delta_M + \frac{1}{2} U^{*2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\delta_M \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\delta_M \end{aligned}$$

当  $\delta_M = 45^\circ$  时,  $\sin 2\delta_M = \sin 90^\circ = 1$ ,  $P_e^* = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) = P_{e(\max)}^*$ 。

$P_e^* = P_{e(\max)}^*$  时, 是电动机负载的极限, 所以极限负载(标么值)

$$P_{e(\max)}^* = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right)$$

此时电动机的电压相量图如图 6-19 所示。

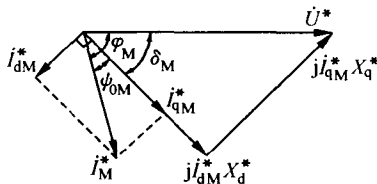


图 6-19 习题 6-27 的电压相量图



由相量图可知

$$U^* \cos \delta_M = I_M^* X_d^* = I_M^* X_d^* \sin \psi_{0M}$$

$$U^* \sin \delta_M = I_{qM}^* X_q^* = I_M^* X_q^* \cos \psi_{0M}$$

则

$$\tan \psi_{0M} = \frac{(\cos \delta_M) X_q^*}{(\sin \delta_M) X_d^*}$$

由于

$$\delta_M = 45^\circ$$

$$\text{所以} \quad \cos \delta_M = \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}, \sin \delta_M = \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\tan \psi_{0M} = \frac{X_q^*}{X_d^*}$$

$$\sin \psi_{0M} = \frac{X_q^*}{\sqrt{X_d^{*2} + X_q^{*2}}}, \quad \cos \psi_{0M} = \frac{X_d^*}{\sqrt{X_d^{*2} + X_q^{*2}}}$$

由相量图可知

$$\psi_{0M} = \varphi_M - \delta_M$$

所以

$$\begin{aligned} \cos \psi_{0M} &= \cos(\varphi_M - \delta_M) = \cos(\varphi_M - 45^\circ) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \varphi_M + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \varphi_M = \frac{X_d^*}{\sqrt{X_d^{*2} + X_q^{*2}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin \psi_{0M} &= \sin(\varphi_M - \delta_M) = \sin(\varphi_M - 45^\circ) \\ &= \sin \varphi_M \times \frac{\sqrt{2}}{2} - \cos \varphi_M \times \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{X_q^*}{\sqrt{X_d^{*2} + X_q^{*2}}} \end{aligned}$$

将两个表达式相减,得

$$\cos \varphi_M = \frac{X_d^* - X_q^*}{\sqrt{2} \sqrt{X_d^{*2} + X_q^{*2}}}$$

此时的电枢电流

$$\begin{aligned} I_M^* &= \frac{U^* \cos \delta_M}{X_d^* \sin \psi_{0M}} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{X_d^* \frac{X_q^*}{\sqrt{X_d^{*2} + X_q^{*2}}}} \\ &= \frac{\sqrt{2} \sqrt{X_d^{*2} + X_q^{*2}}}{2 X_d^* X_q^*} \end{aligned}$$

电枢电流的有功分量

$$I_M^* \cos \varphi_M = \frac{X_d^* - X_q^*}{2X_d^* X_q^*} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right)$$

前面求得的极限负载  $P_{e(\max)}^* = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right)$ , 则

$$P_{e(\max)}^* = I_M^* \cos \varphi_M$$

这就是所求的极限负载(标么值)、电枢电流(标么值)和功率因数三者的表达式。

**6-28** 有一无穷大电网,受端端的线电压  $U_N = 6 \text{ kV}$ ,负载为一线电流  $I = 1000 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0.8$ (滞后)的三相负载。今欲加装同步补偿机,以把线路的功率因数提高到  $0.95$ (滞后),问此时的补偿机将输出多少滞后的无功电流?

**解** 加装补偿机前输入到负载中的电流为

$$\text{有功电流} \quad I_P = I \cos \varphi = 1000 \times 0.8 \text{ A} = 800 \text{ A}$$

$$\text{无功电流} \quad I_Q = I \sin \varphi = 1000 \sin(\arccos 0.8) \text{ A} = 600 \text{ A}$$

计算式中  $\sin \varphi = 0.6$ ,  $\varphi$  为  $I$  滞后  $U$  的电角度,因为  $\cos \varphi = 0.8$ (滞后),所以  $\varphi = 36.87^\circ > 0$ 。

加装补偿机后,若补偿机输出的滞后无功电流为  $I_{\text{补}}$ ,则加装补偿机后,电网的总负载电流为

$$\text{有功电流} \quad I'_P = I_P = 800 \text{ A}$$

$$\text{无功电流} \quad I'_Q = I_Q - I_{\text{补}} = 600 \text{ A} - I_{\text{补}}$$

此时线路的功率因数  $\cos \varphi' = 0.95$ (滞后),则

$$\varphi' = \arccos 0.95 = 18.2^\circ$$

$$\frac{I'_Q}{I'_P} = \frac{I' \sin \varphi'}{I' \cos \varphi'} = \tan \varphi' = \tan 18.2^\circ$$

$$\text{所以} \quad \frac{600 - I_{\text{补}}}{800} = \frac{I'_Q}{I'_P} = \tan 18.2^\circ$$

$$I_{\text{补}} = (600 - 800 \tan 18.2^\circ) \text{ A} = 337 \text{ A}$$

计算表明,此时补偿机需输出  $337 \text{ A}$  的滞后无功电流。

**6-29** 一台接在无穷大电网上的三相同步发电机,已知其端电压为额定电压,额定负载时的励磁电动势为  $E_{0N}$ ,试求发电机作为补偿机运行,且励磁绕组的温升不超过额定温升时,该机能发出的最大滞后无

功率和此时的电枢电流两者的表达式(电枢电阻、空载损耗和磁饱和均忽略不计):

(1) 发电机为隐极机;

(2) 发电机为凸极机。

解 (1) 发电机为隐极机。不计电枢电阻和磁饱和, 隐极发电机的电压方程为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jIX_s$$

发电机作为补偿机运行时, 若不计空载损耗, 则发电机输入、输出的有功功率  $P = 0$ , 即

$$mUI \cos \varphi = 0$$

$$\varphi = 90^\circ$$

当以电压  $\dot{U}$  为参考相量时, 有

$$\dot{U} = U_{N\phi} \angle 0^\circ$$

补偿机向电网发出滞后的无功功率, 则  $I$  滞后  $\dot{U}$  电角度  $90^\circ$ , 同步电抗压降  $jIX_s$  与  $\dot{U}$  同相位, 由  $\dot{E}_0 = \dot{U} + jIX_s = U + IX_s$  知,  $\dot{E}_0$  与  $\dot{U}$  同相位, 功率角  $\delta = 0^\circ$ 。则

$$I = \frac{E_0 - U}{X_s} = \frac{E_0 - U_{N\phi}}{X_s}$$

补偿机发出的滞后无功功率

$$\begin{aligned} Q_2 &= mUI \sin \varphi = mU_{N\phi} \frac{E_0 - U_{N\phi}}{X_s} \sin 90^\circ \\ &= m \frac{U_{N\phi} E_0 - U_{N\phi}^2}{X_s} \end{aligned}$$

当励磁电流  $I_f = I_{fN}$  时, 励磁绕组的温升不会超过额定温升, 且得到了充分利用, 此时  $E_0 = E_{0N}$ , 达最大值, 补偿机发出最大的滞后无功功率

$$Q_{2\max} = m \frac{U_{N\phi} E_{0N} - U_{N\phi}^2}{X_s}$$

此时的定子电流

$$I_{\max} = \frac{E_{0N} - U_{N\phi}}{X_s}$$

(2) 发电机为凸极机。忽略电枢电阻、磁饱和与空载损耗时,  $P_2 =$

0,  $mUI \cos \varphi = 0$ , 相量  $\dot{U}$  与  $\dot{I}$  之间的相位差角  $\varphi = 90^\circ$ , 补偿机发出滞后的无功功率, 所以电流  $\dot{I}$  滞后电压  $\dot{U}$  电角度  $90^\circ$ 。此时内功率因数角

$$\varphi_0 = \arctan \frac{U \sin \varphi + IX_q}{U \cos \varphi} = \arctan \frac{U + IX_q}{0} = 90^\circ$$

励磁电动势  $E_0$  超前电流  $\dot{I}$  的电角度  $\varphi_0 = 90^\circ$ , 则  $E_0$  与  $\dot{U}$  同相位, 即

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q = \dot{U} + j\dot{I} X_d = \dot{U} + IX_d$$

所以

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{X_d}$$

当  $I_f = I_{fN}$  时,  $E_0 = E_{0N}$  最大, 对应的最大滞后无功电流

$$I_{\max} = \frac{E_{0N} - U_{N\phi}}{X_d}$$

发电机发出的最大滞后无功功率

$$Q_{2\max} = mU_{N\phi} I_{\max} = m \frac{U_{N\phi} E_{0N} - U_{N\phi}^2}{X_d}$$

**6-30** 有一台三相凸极同步发电机, 测得各参数如下:  $X_d^* = 1.0$ ,  $X_d''^* = 0.2$ ,  $X_q''^* = 0.21$ ,  $X_0^* = 0.1$ 。试求空载额定电压下发电机的三相、线间和单相稳态短路电流的标幺值(电枢电阻不计)。

**解** 在空载额定电压下,  $E_0^* = 1.0$ , 不计电枢电阻,  $R_a \approx 0$ , 各稳态短路电流如下。

(1) 三相稳态短路电流

$$I_{K3}^* = \frac{E_0^*}{X_d^*} \approx \frac{E_0^*}{X_d^*} = \frac{1.0}{1.0} = 1$$

(2) 线间稳态短路电流

$$\begin{aligned} I_{K2}^* &= \frac{\sqrt{3}E_0^*}{X_d^* + X_q''^*} \approx \frac{\sqrt{3}E_0^*}{X_d^* + \frac{1}{2}(X_d''^* + X_q''^*)} \\ &= \frac{\sqrt{3} \times 0.1}{1.0 + \frac{1}{2} \times (0.2 + 0.21)} \approx 1.437 \end{aligned}$$

(3) 单相稳态短路电流

$$I_{K1}^* = \frac{3E_0^*}{X_d^* + X_q''^* + X_0^*} = \frac{3 \times 1.0}{1.0 + \frac{1}{2} \times (0.2 + 0.21) + 0.1} = 2.299$$

### 6.3 经典题型

1. 当同步发电机与无穷大电网并联运行并输出额定功率时, 调节励磁电流使发电机的  $\cos\varphi = 1$ 。若保持励磁电流不变, 在增大和减小有功功率输出两种情况下, 分别讨论发电机功率因数将怎样变化?

答 当同步发电机与无穷大电网并联运行时, 在额定负载下调节励磁电流使  $I_f = I_{fN}$ ,  $\cos\varphi = 1$ , 保持励磁电流不变。若增大有功功率输出, 以定子电阻为零的隐极同步发电机为例, 电流变化如图 6-20(a) 所示, 此时因  $I_f = I_{fN}$  不变,  $E_0$  保持不变, 电压与频率不变, 则有功功率增大后  $E\sin\theta$  增大。由  $\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX_s}$  知, 电流在幅值增大的同时相位前移, 在有功分量增大的同时, 又有超前的无功功率输出, 发电机处于欠励状态。

反之,  $I_f = I_{fN}$  不变,  $U$ 、 $f$  不变, 有功功率减小, 则电枢电流有功分量减小, 同时发出滞后的无功电流, 如图 6-20(b) 所示。此时发电机向电网输出部分滞后无功功率, 发电机处于过励状态。因此, 保持励磁电流不变, 在调节原动机有功功率时, 能在调节发电机有功功率输出的同时, 调节无功功率输出。

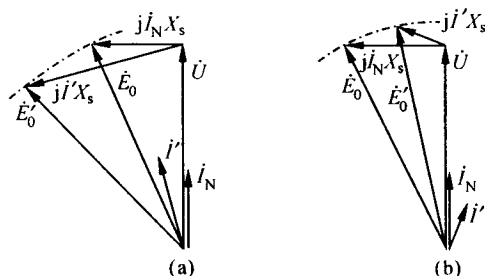


图 6-20 题 1 的发电机相量图

(a) 增大有功功率; (b) 减小有功功率

2. 一台三相汽轮发电机空载试验和短路试验都在半同步速下进行, 已知空载试验数据为励磁电流标幺值  $I_{fN}^* = 1.0$ , 空载电势标幺值  $E_0^* = 0.5$ ; 短路试验数据为励磁电流标幺值  $I_{fN}^* = 1.0$ , 短路电流标幺值  $I_K^* = 1.0$ 。忽略电阻  $R$ , 令发电机与无穷大电网并联运行。求:

(1) 同步电抗标么值;

(2) 同步速运行电枢电流标么值  $I^* = 1$ , 负载功率因数  $\cos\varphi = \frac{\sqrt{3}}{2}$  (滞后) 时的功率角  $\delta$  为多少?

(3) 过载能力。

解 (1) 由于电枢电势  $E$  与频率成正比, 与转速成正比, 因此空载试验  $I_N^* = 1$  时电势换算为同步速后  $E_0^* = 1$ 。

短路试验中由于电势和发电机电抗均与频率成正比, 故  $I_N^* = 1$  时,  $I_K^*$  仍等于 1。

$$\text{同步电抗标么值 } X_s^* = \frac{E_0^*}{I_K^*} = \frac{1}{1} = 1。$$

(2) 在  $I^* = 1, \cos\varphi = \frac{\sqrt{3}}{2}$  (滞后) 时并网运行, 此时电动势

$$\begin{aligned} E_0^* &= \sqrt{(U^* \sin\varphi + I^* X_s^*)^2 + (U^* \cos\varphi)^2} \\ &= \sqrt{(1 \times 0.5 + 1 \times 1)^2 + \left(1 \times \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} = 1.732 \end{aligned}$$

当  $I^* = 1, \cos\varphi = \frac{\sqrt{3}}{2}$  时, 输出功率  $P_2^* = U^* I^* \cos\varphi = 0.866$ 。不计电阻  $R_s$ , 电磁功率  $P_{em}^*$  应等于  $P_2^*$ , 即

$$P_{em}^* = \frac{U^* E^*}{X_s^*} \sin\delta = 0.866, \sin\delta = \frac{0.866 \times 1}{1 \times 1.732} = 0.5$$

$$\text{功率角} \quad \delta = 30^\circ$$

(3) 过载能力

$$k_p = \frac{1}{\sin\delta} = \frac{1}{\sin 30^\circ} = 2$$

3. 三相隐极同步发电机, Y 联结,  $S_N = 60 \text{ kVA}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ , 同步电抗  $X_s = 1.55 \Omega$ 。当发电机过励磁,  $\cos\varphi = 0.8$  (滞后),  $S = 37.5 \text{ kVA}$  时, 求:

(1) 电动势  $E_0$  和功率角  $\delta$  (电枢电阻忽略不计);

(2) 拆除原动机, 不计损耗时的电枢电流;

(3) 保持电磁功率和励磁电流不变, 作电动机运行, 试画出电动势

相量图；

(4) 电动机机械负载不变, 电磁功率不变, 若  $\cos\varphi = 1$ , 求此时电动机的电动势  $E_0$ 。

解 (1)  $S = 37.5 \text{ kVA}$ , 作发电机运行, 则

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_N} = \frac{37.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} \text{ A} = 56.98 \text{ A}$$

以  $\dot{U}_{N\Phi}$  为参考相量  $\dot{U}_{N\Phi} = U_{N\Phi} \angle 0^\circ$ , 则

$$\begin{aligned} \dot{E}'_0 &= \dot{U}_{N\Phi} + j\dot{I}X_s = [380/\sqrt{3} + 56.98 \times 1.55 \angle (90^\circ - 36.87^\circ)] \text{ V} \\ &= 281.8 \angle 14.51^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

功率角  $\delta = 14.51^\circ$

(2) 拆除原动机, 电磁功率和电磁转矩均为零,  $\delta = 0$ , 此时

$$I = \frac{E_0 - U}{X_s} = \frac{281.8 - 220}{1.55} \text{ A} = 39.87 \text{ A}$$

(3) 电机作为电动机运行, 保持电磁功率和励磁电流不变, 画出电势相量图, 如图 6-21 所示(发电机与电动机的电磁功率数值相同, 但传递方向相反)。

(4)  $\cos\varphi = 0.8$  时,  $P_e = 37.5 \times \cos\varphi = 37.5 \times 0.8 \text{ kW} = 30 \text{ kW}$ , 若保持它不变,  $\cos\varphi = 1$  时, 电枢电流

$$\begin{aligned} I &= \frac{P_e}{mU_s \cos\varphi} = \frac{30 \times 10^3}{3 \times 220 \times 1} \text{ A} \\ &= 45.45 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_0 &= \dot{U} - j\dot{I}X_s \\ &= (220 \angle 0^\circ - j45.45 \times 1.55) \text{ V} \\ &= 230.98 \angle -17.76^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

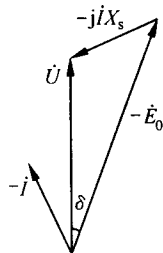


图 6-21 题 3 的电势相量图

4. 有两台相同的隐极同步电机, 一台用作发电机(由原动机拖动, 保持额定转速), 供电给另一台电动机。若调节两台电机的励磁电流和电动机的机械负载, 则满载时具有额定电压和  $\cos\varphi = 1$ 。已知电机的同步电抗标幺值为 0.5, 各种损耗忽略不计。现在逐渐增大电动机的机械负载, 试求:

- (1) 同步电动机所能产生的最大临界功率的标么值是多少?  
 (2) 产生最大临界功率时电机的端电压标么值是多少?

解 两电机相连时等效电路和相量图如图 6-22 所示。

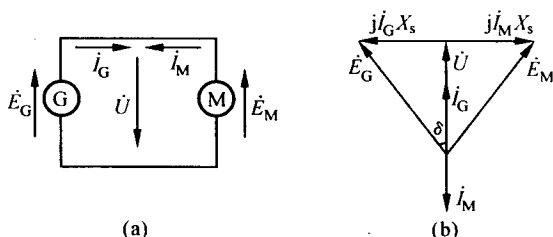


图 6-22 题 4 的电机等效电路与相量图

(a) 等效电路; (b) 相量图

- (1) 两电机均为额定电压、额定负载和  $\cos\varphi = 1$  时的电势  $E_G$ 、 $E_M$  标么值

$$E_G^* = E_M^* = \sqrt{U^{*2} + (I_G^* X_s^*)^2} = \sqrt{1^2 + (1 \times 0.5)^2} = \frac{\sqrt{5}}{2}$$

增加电动机负载,保持频率不变,同步电抗不变,则励磁不变,  $E_G^*$ 、 $E_M^*$  也不变。增大负载使  $\delta$  角增大,电压  $U$  降低,由相量图可知,当  $\delta = 45^\circ$  时电磁功率达最大值。

$$\text{此时 } U^* = I^* X_s^* = \frac{\sqrt{2}}{2} E^* = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{\sqrt{5}}{2} = \frac{\sqrt{10}}{4}$$

$$P_{e(\max)}^* = \frac{E^* U^*}{X_s^*} \sin\delta = \frac{\frac{\sqrt{5}}{2} \times \frac{\sqrt{10}}{4}}{0.5} \sin 45^\circ = 1.25$$

- (2) 最大临界功率时的端电压标么值

$$U^* = \frac{\sqrt{2}}{2} E^* = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{\sqrt{5}}{2} = 0.79$$

5. 两台相同的三相同步发电机,已知  $S_N = 40 \text{ kVA}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$  (Y 联结),  $\cos\varphi_N = 0.8$ ,  $X_d = 4.5 \Omega$ ,  $X_q = 3.6 \Omega$ 。此两发电机接同一负载并联运行,当一台发电机额定运行时,另一台发电机的定子电流为零,



励磁电流为 5 A。现要求两台发电机平均承担有功功率和无功功率(电压、频率和总负载不变),试求此时每台发电机的励磁电流是多少(不计定子电阻和饱和)?

**解** 由题意,第二台发电机电流为零时励磁电流为 5A,即此发电机的励磁电动势等于额定电压值,  $E_0 = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} \text{ V} = 220 \text{ V}$ 。

发电机额定电流

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{40 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} \text{ A} = 60.77 \text{ A}$$

功率因数角

$$\varphi_N = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$$

要求两台发电机分担相同的有功和无功功率,以相电压为参考相量,两台发电机的电流

$$I_1 = I_2 = \frac{1}{2} I_N = \frac{60.77}{2} \angle -36.87^\circ \text{ A} = 30.39 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

不考虑定子电阻时,发电机的相量图如图 6-23 所示。

欲求半载条件下的励磁电流,应求出此时的电动势  $E_0$ ,而求  $E_0$  首先应确定  $I_q$ 、 $I_d$  的大小。

$$\begin{aligned} \dot{E}_Q &= \dot{U} + jI X_q \\ &= 220 + j30.39(\angle -36.87^\circ) \times 3.6 \\ &= 298.7 \angle 17.03^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\phi_0 = \varphi + \delta = 36.87 + 17.03 = 53.9^\circ$$

电流的直轴与交轴分量分别为

$$I_d = I \sin \phi_0 = 30.39 \sin 53.9^\circ \text{ A} = 24.55 \text{ A}$$

$$I_q = I \cos \phi_0 = 30.39 \cos 53.9^\circ \text{ A} = 17.90 \text{ A}$$

励磁电动势

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jI_d X_d + jI_q X_q$$

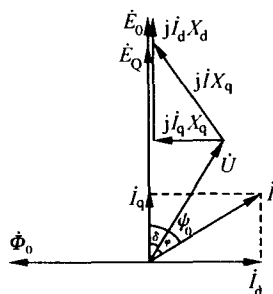


图 6-23 题 5 的电机相量图

$$\begin{aligned}
 &= (220 + j17.9 \times 3.6 \angle 17.03^\circ + j24.55 \times 4.5 \angle -72.97^\circ) \text{ V} \\
 &= 320.8 \angle 17.03^\circ \text{ V}
 \end{aligned}$$

不计饱和时,励磁电流与电动势成正比,则

$$I_f = \frac{E_0}{U_N / \sqrt{3}} \times I_{fN} = \frac{320.8}{380 / \sqrt{3}} \times 5 \text{ A} = 7.29 \text{ A}$$

6. 两台相同的三相 Y 联结同步发电机并联运行,两原动机有相同的负载速率特性,已知  $X_s = 62 \Omega$ ,  $R_s = 2.18 \Omega$ 。两发电机共同输出 1830 kW 给一感性负载,负载端电压为 13800 V,  $\cos\varphi = 0.83$ ,若调节两发电机励磁,使一发电机的无功电流为 40 A,试求:

(1) 两台发电机的电流各为多少?

(2) 两台发电机的励磁电动势各为多少?

解 设无功电流为 40 A 的发电机为 A 机,另一台为 B 机,则总的有功电流

$$I_P = \frac{1830 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13800} \text{ A} = 76.5 \text{ A}$$

功率因数角

$$\varphi = \arccos 0.83 = 33.9^\circ$$

总的无功电流

$$I_Q = 76.5 \tan 33.9^\circ \text{ A} = 51.4 \text{ A}$$

(1) 因为原动机有相同的负载速率特性,两发电机的有功负载应相同,即两者有功电流相同。令  $\dot{U} = U \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则 A 机有功电流为  $\frac{76.5}{2} \text{ A} = 38.25 \text{ A}$ , A 机总电流

$$\dot{I}_A = (38.25 - j40) \text{ A} = 55.35 \angle -46.28^\circ \text{ A}$$

B 机有功电流同样为 38.25 A, 无功电流为  $(51.4 - 40) \text{ A} = 11.4 \text{ A}$ , 则 B 机总电流

$$\dot{I}_B = (38.25 - j11.4) \text{ A} = 39.9 \angle -16.6^\circ \text{ A}$$

(2) 两台发电机的励磁电动势分别为

$$\dot{E}_{0A} = \dot{U} + \dot{I}_A R_s + j\dot{I}_A X_s = \left( \frac{13800}{\sqrt{3}} + 55.35 \angle -46.28^\circ \times 2.18 + \right.$$

$$\left. j55.35 \angle -46.28^\circ \times j62 \right) \text{ V} = 10774 \angle 12.24^\circ \text{ V}$$

$$\dot{E}_{0B} = \dot{U} + \dot{I}_B R_s + j\dot{I}_B X_s = \left( \frac{13800}{\sqrt{3}} + 39.9 \angle -16.6^\circ \times 2.18 + \right.$$

$$\left. j39.9 \angle -16.6^\circ \times j62 \right) \text{ V} = 9066 \angle 14.99^\circ \text{ V}$$

7. 试证明考虑定子电阻时, 隐极同步发电机的电磁功率可以写成

$$P_e = \frac{mE_0 E}{X_s} \sin \theta_i, \theta_i \text{ 为 } \dot{E}_0 \text{ 和 } \dot{E} \text{ 的夹角。}$$

证 隐极同步发电机的相量图如图 6-24 所示。

$$\begin{aligned} P_e &= mEI \cos \varphi_i \\ &= mEI \cos(\psi_0 - \theta_i) \\ &= mEI (\cos \psi_0 \cos \theta_i + \sin \psi_0 \sin \theta_i) \\ &= mEI_q \cos \theta_i + mE_s I_d \sin \theta_i \end{aligned}$$

由相量图可知

$$I_q X_s = E \sin \theta_i, \quad I_q = \frac{E \sin \theta_i}{X_s}$$

$$I_d X_s = E_0 - E \cos \theta_i, \quad I_d = \frac{E_0 - E \cos \theta_i}{X_s}$$

将  $I_q$  和  $I_d$  两式代入  $P_e$  式中, 得

$$P_e = \frac{mE^2 \sin \theta_i \cos \theta_i}{X_s} + mE \sin \theta_i \frac{E_0 - E \cos \theta_i}{X_s} = \frac{mE_0 E}{X_s} \sin \theta_i$$

证毕。

8. 有一台汽轮发电机接到电网, 在额定运行情况下,  $\cos \varphi = 0.8$  (滞后),  $X_s^* = 1.0$ , 试求:

(1) 当该发电机供给 90% 额定电流且有额定功率因数时, 励磁电动势标么值  $E_0^*$  和功率角  $\delta$  为多少?

(2) 如调节原动机的输入功率, 使该发电机的有功功率达到额定功率的 110%, 励磁保持不变, 这时的  $\delta$  角为多少? 无功功率将如何变化?

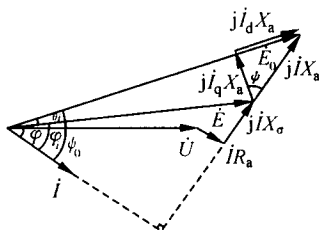


图 6-24 题 7 的隐极同步发电机相量图

(3) 如保持原动机的输入功率不变, 调节励磁电流, 使该发电机的无功功率为额定功率的 110%, 这时的励磁电动势标么值  $E_0^*$  和功率角  $\delta$  为多少?

解 (1) 令  $\dot{U}^* = \dot{U}_N^* = 1 \angle 0^\circ$ , 已知  $I^* = 0.9$ ,  $\cos\varphi = 0.8$ , 故负载电流标么值

$$\dot{I}^* = I^* \cos\varphi - j I^* \sin\varphi = 0.9 \times 0.8 - j 0.9 \times 0.6 = 0.72 - j 0.54$$

励磁电动势标么值

$$\begin{aligned} \dot{E}_0^* &= \dot{U}^* + j \dot{I}^* X_s^* = 1 + j(0.72 - j 0.54) \times 1 \\ &= 1.54 + j 0.72 = 1.70 \angle 25.1^\circ \end{aligned}$$

故得

$$E_0^* = 1.70, \quad \delta = 25.1^\circ$$

(2) 已知  $P^* = 0.8 \times 1.1 = 0.88$ ,  $E_0^* = 1.70$ 。由功角特性公式得

$$P_c^* = \frac{E_0^* U^*}{X_s^*} \sin\delta$$

$$\sin\delta = \frac{P_c^* X_s^*}{E_0^* U^*} = \frac{0.88 \times 1}{1.70 \times 1} = 0.518$$

故

$$\delta = \arcsin 0.518 = 31.2^\circ$$

这时励磁电动势标么值

$$\begin{aligned} \dot{E}_0^* &= 1.70(\cos\delta + j\sin\delta) = 1.70(0.856 + j 0.518) \\ &= 1.454 + j 0.880 \end{aligned}$$

由

$$\dot{E}_0^* = \dot{U}^* + j \dot{I}^* X_s^*$$

$$\text{得 } \dot{I}^* = \frac{\dot{E}_0^* - \dot{U}^*}{j X_s^*} = \frac{1.454 + j 0.880 - 1}{j \times 1.0} = 0.880 - j 0.454$$

可见无功电流由 0.54 减为 0.454, 即为原来的 84.1%, 故发电机的无功功率也按同样比例减小。

(3) 已知  $P^* = I_a^* = 0.72$ ,  $Q^* = I_r^* = 0.6 \times 1.1 = 0.66$

$$\begin{aligned} \dot{E}_0^* &= \dot{U}^* + j \dot{I}^* X_s^* = 1 + j(0.72 - j 0.66) \times 1 \\ &= 1.66 + j 0.72 = 1.81 \angle 23.5^\circ \end{aligned}$$

此时励磁电动势标么值增加到 1.81,  $\delta$  角则减小为  $23.5^\circ$ 。

9. 一台三相凸极同步电动机并联到电网上运行,  $U_N = 380 \text{ V}$  (Y 联

结),  $X_d = 15 \Omega$ ,  $X_q = 11 \Omega$ , 忽略电枢电阻。已知在额定电压下输入功率  $P_1 = 11.43 \text{ kW}$ , 功率因数  $\cos\varphi = 0.866$  (超前)。

(1) 画出运行时的电动势相量图, 并求出  $\delta$  和  $E_0$  各是多少?

(2) 若此时电动机失去励磁, 问能否继续稳定运行?

解 (1) 先求一相电流和电压。

$$I_M = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi} = \frac{11.43 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.866} \text{ A} = 20 \text{ A}$$

$$U = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} \text{ V} = 220 \text{ V}$$

$$I_M X_q = 20 \times 11 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

先作出  $\dot{U}$  和  $\dot{I}_M$  相量, 如图 6-25 所示, 与  $\dot{I}_M$  相量垂直方向截取  $\overline{ab} = I_M X_q$  可找到  $b$  点, 连  $ob$  直线即为  $\dot{E}_0$  方向线。从  $oab$  三角形几何关系可知  $\delta_M = 30^\circ$ 。分解  $\dot{I}_M$  为  $\dot{I}_{qM}$  及  $\dot{I}_{dM}$ , 则

$$I_{dM} = I \sin\varphi_{0M} = 20 \sin 60^\circ \text{ A} = 17.32 \text{ A}$$

$$I_q = I \cos\varphi_{0M} = 20 \cos 60^\circ \text{ A} = 10 \text{ A}$$

根据电动机方程式  $\dot{U} = \dot{E}_0 + j\dot{I}_{qM}X_q + j\dot{I}_{dM}X_d$  可得到  $\dot{E}_0$  相量。

$$E_0 = U \cos\delta_M + I_{dM}X_d = (220 \times \cos 30^\circ + 17.32 \times 15) \text{ V} = 450 \text{ V}$$

(2) 若电动机失去励磁, 则电磁功率中第一项为零, 只剩第二项

$$P_e = m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_M$$

当  $\delta = 45^\circ$  时,  $P_e$  达最大值  $P_{e(\max)}$ , 最大值为

$$\begin{aligned} P_{e(\max)} &= m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) = 3 \times \frac{220^2}{2} \left( \frac{1}{11} - \frac{1}{15} \right) \text{ W} \\ &= 1760 \text{ W} \end{aligned}$$

这时由于电动机的负载功率较大, 与原输入功率  $P_1$  接近, 而这时的最大电磁功率  $P_{e(\max)} < P_1$ , 所以电动机带不动负载, 将不能继续运行。

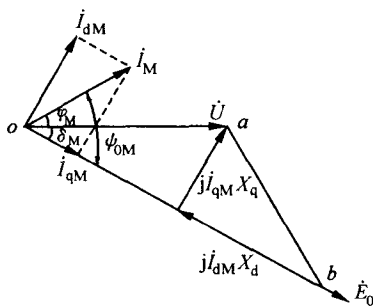


图 6-25 题 9 的电机相量图

## 6.4 补充习题及解答

### 6.4.1 补充习题

1. 画出隐极同步发电机带上电感负载和电容负载两种情况下的时-空统一矢量图,说明两种情况下电枢反应磁动势  $F_a$  各起什么作用。

2. 一台三相 Y 联结的隐极同步发电机,空载时使端电压为 220 V 所需的励磁电流为 3 A。当发电机接上每相  $5 \Omega$  的 Y 联结电阻负载时,要使端电压仍为 220 V,所需的励磁电流为 3.8 A。不计电枢电阻,试求不饱及时发电机的同步电抗是多少?

3. 一台三相 Y 联结的隐极同步发电机,额定电流  $I_N = 60 \text{ A}$ ,同步电抗  $X_s = 1 \Omega$ ,电枢电阻忽略不计,调节励磁电流使空载端电压为 480 V。保持此励磁电流不变,当发电机输出功率因数为 0.8(超前)的额定电流时,发电机的端电压为多大?此时的电枢反应磁动势起何作用?

4. 一台 2 极汽轮发电机与无穷大电网并联运行,定子绕组 Y 联结,已知:  $U_N = 18000 \text{ V}$ ,  $I_N = 11320 \text{ A}$ ,  $\cos\varphi = 0.85$ (滞后),  $X_s = 2.1 \Omega$ (不饱和值),电枢电阻忽略不计。当发电机输出额定功率时,试求:

- (1) 励磁电动势  $E_0$ ;
- (2) 功率角  $\delta_N$ ;
- (3) 电磁功率  $P_e$ ;
- (4) 过载能力。

5. 一台隐极同步发电机带三相对称负载,  $\cos\varphi = 1$ ,此时端电压  $U = U_N$ ,电枢电流  $I = I_N$ ,若该发电机的  $X_s^* = 0.15$ ,  $X_d^* = 0.85$ ,忽略定子电阻,用时间相量图求出励磁电动势  $E_0^*$  和功率角  $\delta$  各为多大?

6. 一台隐极同步发电机的同步电抗为  $X_s^* = 1.8$ ,额定功率因数  $\cos\varphi = 0.87$ (滞后),当励磁电流  $I_f^* = 1$  时,其励磁电动势为  $E_0^* = 1$ 。不计电枢电阻和漏电抗,设磁路线性,如果将发电机气隙加大一倍,则同步电抗标么值为多大?产生空载额定电压和三相稳态短路额定电流所需的励磁电流标么值各为多大?

7. 一台凸极同步发电机额定容量  $S_N = 62500 \text{ kVA}$ ,定子绕组 Y 联

结,额定频率为 50 Hz,额定功率因数为  $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后),直轴同步电抗  $X_d^* = 0.8$ ,交轴同步电抗  $X_q^* = 0.6$ ,  $R_s = 0$ 。试求额定负载下发电机的电压调整率。

8. 有一台三相凸极同步发电机,已知:额定功率因数  $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后),  $X_q^* = 0.6$ ,  $X_d^* = 0.2$ 。忽略定子电阻,空载和短路特性如下表所示。求:

空载特性										短路特性	
$U_L^*$	0.275	0.55	0.93	0.97	1.0	1.10	1.15	1.20	1.26	$I_K^*$	0 1
$I_f^*$	0.25	0.5	0.9	0.95	1.0	1.2	1.32	1.50	2.0	$I_f^*$	0 0.9

(1) 直轴同步电抗  $X_d^*$  (不饱和值);

(2) 短路比  $k_c$ ;

(3) 若直轴电枢反应磁动势用转子励磁电流表示为  $I_{ab}^* = 0.8$ ,求额定励磁电流  $I_{fN}^*$ ;

(4) 电压调整率  $\Delta u$ 。

9. 一台并联于无限大电网运行的同步发电机,其电流滞后于电压。如果逐渐减小其励磁电流,试问电枢电流如何变化?

10. 同步发电机并联运行时,如果(1) 发电机电压大于或小于电网电压;(2) 发电机频率大于或小于电网频率。其他条件均符合,那么合闸后分别会发生下列哪种情况?

A. 发电机输出滞后无功电流;

B. 发电机输入滞后无功电流;

C. 发电机输出有功电流;

D. 发电机输入有功电流。

11. 一台 11 kV、50 Hz、4 极、Y 联结的隐极同步发电机,同步电抗  $X_s = 12 \Omega$ ,不计电枢绕组电阻。该发电机并联于无限大电网运行,输出有功功率 3 MW,功率因数为 0.8(滞后)。求:

(1) 每相励磁电动势  $E_0$  和功率角  $\delta$ ;

(2) 如果励磁电流保持不变,发电机不失去同步时所能产生的最大电磁转矩。

12. 一台汽轮发电机并联于无限大电网, 额定负载时功率角  $\delta = 20^\circ$ 。现因电网发生故障, 电网电压降为  $60\%U_N$ , 问为使  $\delta$  不超过  $25^\circ$ , 应加大励磁电流使  $E_0$  上升为原来的多少倍?

13. 一台汽轮发电机额定容量  $S_N = 31250 \text{ kVA}$ , 额定电压  $U_N = 10500 \text{ V}$  (Y 联结), 额定功率因数  $\cos\varphi_N = 0.8$  (滞后), 定子每相同步电抗  $X_s = 7 \Omega$  (不饱和值), 如果把励磁电流增大  $10\%$ , 求  $P_e$ 、 $\delta$  及  $\varphi$ , 问输出的有功功率及无功功率怎样变化?

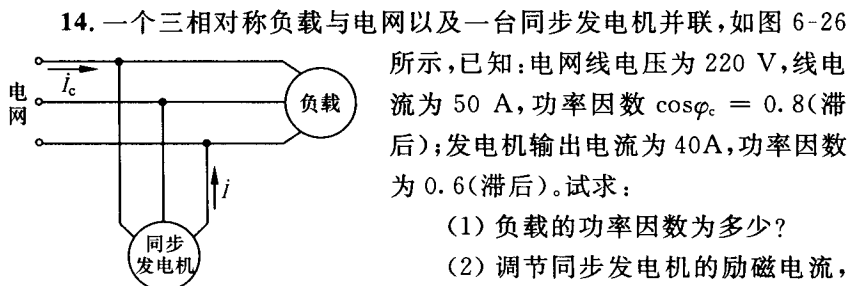


图 6-26 题 14 的电路联结图

多少? 从电网吸收的电流  $I_c$  为多少?

15. 一台隐极汽轮发电机, 并联于无限大电网运行, 额定功率角  $\delta_N = 30^\circ$ , 今因电网故障, 电网电压降为  $0.8U_N$ , 电网频率保持不变。试求:

(1) 发电机能否继续稳定运行, 这时功率角为多大。

(2) 若加大励磁电流使  $E_0$  增大到原来的  $1.6$  倍, 这时功率角为多大。

16. 一水电站给一远距离用户供电, 为改善功率因数加装一台同步补偿机, 问应装在电站内, 还是装在离用户较近的变电站内? 为什么?

17. 并联于电网上运行的同步电机, 从发电机状态变为电动机状态时, 其功率角  $\delta$ 、电磁转矩  $T$ 、电枢电流  $I$  以及功率因数会发生怎样的变化?

18. 一台同步发电机的参数为  $Z_+^* = 1.55$ ,  $Z_-^* = 0.215$ ,  $Z_0^* = 0.054$ 。设空载电压为额定电压, 求发生下述短路故障时的稳态短路电流 (忽略定子



绕组电阻)：

- (1) 三相短路时短路电流；
- (2) 两线之间短路时的短路电流；
- (3) 一线对中性点短路时的短路电流。

#### 6.4.2 补充习题解答

1. 解 带电感负载和电容负载时的时-空统一矢量图如图 6-27(a)、(b) 所示。在电感负载下,  $F_b < F_{fl}$ , 电枢反应磁动势  $F_a$  起直轴去磁作用; 而在电容负载下,  $F_b > F_{fl}$ ,  $F_a$  起直轴增磁作用。

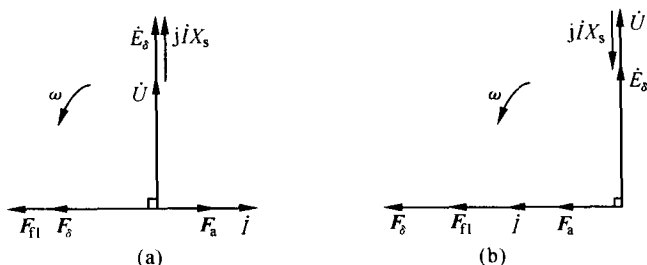


图 6-27 题 1 的时-空统一矢量图

(a) 电感负载; (b) 电容负载

2. 解 空载时,  $I_f' = 3 \text{ A}$ ,  $E_0' = \frac{220}{\sqrt{3}} \text{ V} = 127 \text{ V}$

$I_f = 3.8 \text{ A}$  时,  $E_0 = \frac{I_f}{I_f'} E_0' = \frac{3.8}{3} \times 127 \text{ V} = 160.87 \text{ V}$

接上  $5 \Omega$  对称电阻负载时, 有

$$I = \frac{U}{R_L} = \frac{220/\sqrt{3}}{5} \text{ A} = \frac{127}{5} \text{ A} = 25.4 \text{ A}$$

由于  $\cos\varphi = 1$ ,  $I$  与  $U$  同相位,  $jIX_s$  与  $U$  垂直, 故有

$$E_0^2 = U^2 + (IX_s)^2$$

所以  $X_s = \frac{1}{I} \sqrt{E_0^2 - U^2} = \frac{1}{25.4} \sqrt{160.87^2 - 127^2} \Omega = 3.887 \Omega$

3. 解  $E_0 = \frac{480}{\sqrt{3}} \text{ V} = 277.13 \text{ V}$ ,  $IX_s = I_N X_s = 60 \times 1 \text{ V} = 60 \text{ V}$ ,

$$\varphi = -\arccos 0.8 = -36.87^\circ, \sin \varphi = -0.6。$$

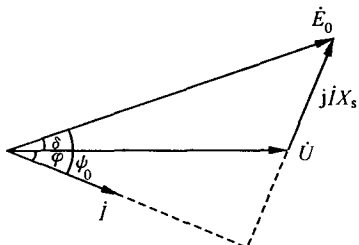
$$E_0 \sin \delta = IX_s \cos \varphi, \quad E_0 \cos \delta = U + IX_s \sin \varphi$$

$$\text{所以 } \delta = \arcsin \frac{IX_s \cos \varphi}{E_0} = \arcsin \frac{60 \times 0.8}{277.13} = 9.97^\circ$$

$$U = E_0 \cos \delta - IX_s \sin \varphi$$

$$= [277.13 \cos 9.97 - 60 \times (-0.6)] \text{ V} = 308.94 \text{ V}$$

$$U_L = \sqrt{3}U = \sqrt{3} \times 308.94 \text{ V} = 535.1 \text{ V}$$



由于  $\dot{E}_0$  超前  $\dot{U}$  的角度  $\delta = 9.97^\circ$ ,  $\dot{i}$  超前  $\dot{U}$  的角度为  $36.87^\circ$ , 因此  $\dot{i}$  超前  $\dot{E}_0$  的角度为  $36.87^\circ - 9.97^\circ = 26.9^\circ$ , 所以电枢反应电动势兼有直轴增磁和交轴的作用。

4. 解 (1) 作出汽轮发电机相量

图 6-28 题 4 的发电机相量图 图如图 6-28 所示。

$$\varphi_N = \arccos 0.85 = 31.8^\circ$$

$$U = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{18000}{\sqrt{3}} \text{ V} = 10392.305 \text{ V}$$

$$I = I_N = 11320 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} E_0 &= \sqrt{(U \cos \varphi_N)^2 + (U \sin \varphi_N + IX_s)^2} \\ &= \sqrt{(10392.305 \cos 31.8^\circ)^2 + (10392.305 \sin 31.8^\circ + 2.1 \times 11320)^2} \text{ V} \\ &= 30552.782 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (2) \delta_N &= \varphi_N - \varphi = \arctan \frac{U \sin \varphi_N + IX_s}{U \cos \varphi_N} - \varphi_N \\ &= \arctan \frac{10392.305 \sin 31.8^\circ + 2.1 \times 11320}{10392.305 \cos 31.8^\circ} - 31.8^\circ \\ &= 41.397^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (3) P_e &= \frac{3UE_0}{X_s} \sin \delta_N \\ &= \frac{3 \times 10392.305 \times 30552.782 \times \sin 41.397^\circ}{2.1} \text{ W} \\ &= 273.865 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$(4) k_p = \frac{1}{\sin \delta_N} = \frac{1}{\sin 41.397^\circ} = 1.512$$

5. 解  $U = U_N, I = I_N, \cos \varphi = 1$ , 则  $U^* = 1, I^* = 1, \varphi = 0$ 。

$$I^* X_s^* = 1 \times 0.15 = 0.15, I^* X_a^* = 1 \times 0.85 = 0.85$$

$$I^* X_s^* = I^* X_s^* + I^* X_a^* = 0.15 + 0.85 = 1$$

画出时间相量图,如图 6-29 所示。根据

以上数据可得  $E_0^* = \sqrt{2}, \delta = 45^\circ$ 。

6. 解 磁路线性时,气隙加大一倍,则气隙磁导减小一半。不计漏电抗,则同步电抗减少一半,即  $X_s^* = 0.9$ ;在同样励磁电流下,气隙磁通密度也减小一半,因此空载电动势  $E_0$  也减小一半。

气隙加大一倍后,产生空载额定电压所需励磁电流

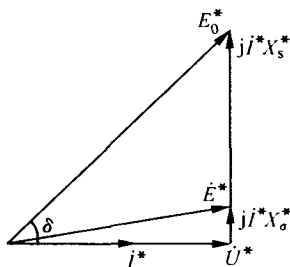


图 6-29 题 5 的时间相量图

$$I_{f0}^* = \frac{U_N^*}{\frac{1}{2} E_0^*} I_t^* = \frac{1}{\frac{1}{2} \times 1} \times 1 = 2$$

产生额定短路电流时,  $E_0'^* = I_N^* X_s^* = 1 \times 0.9 = 0.9$ , 所需的励磁电流

$$I_{fk}^* = \frac{E_0'^*}{\frac{1}{2} E_0^*} I_t^* = \frac{0.9}{\frac{1}{2} \times 1} \times 1 = 1.8$$

$$\begin{aligned} 7. \text{ 解 } \psi_0 &= \arctan \frac{U^* \sin \varphi_N + I^* X_q^*}{I^* R_s^* + U^* \cos \varphi_N} = \arctan \frac{1 \times 0.6 + 1 \times 0.6}{0 + 1 \times 0.8} \\ &= 56.31^\circ \end{aligned}$$

$$\varphi = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$$

$$\delta = \psi_0 - \varphi = 56.31^\circ - 36.87^\circ = 19.44^\circ$$

$$I_d^* = I^* \sin \psi_0 = 1 \times \sin 56.31^\circ = 0.832$$

$$E_0^* = I_d^* X_d^* + U^* \sin \delta = 0.832 \times 0.8 + 1 \times \sin 19.44^\circ = 1.6086$$

则电压调整率

$$\Delta u = \frac{E_0^* - U_N^*}{U_N^*} \times 100\% = \frac{1.6086 - 1}{1} \times 100\% = 60.86\%$$

8. 解 作出发电机空载特性曲线和短路特性曲线,如图 6-30 所示。作出气隙线,它经过  $I_f^* = 1, E_0^* = 1.105$  点,气隙线斜率为

$$\frac{E_0^*}{I_f^*} = \frac{1.105}{1} = 1.105$$

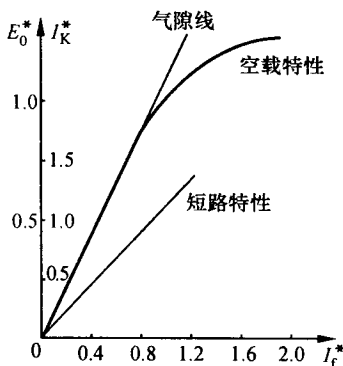


图 6-30 题 8 的发电机空载和短路特性

短路特性曲线的斜率为

$$\frac{I_K^*}{I_f^*} = \frac{1}{0.9} = 1.111$$

(1) 直轴同步电抗的不饱和值为

$$X_d^* = \frac{E_0^*}{I_K^*} = \frac{E_0^* / I_f^*}{I_K^* / I_f^*} = \frac{1.105}{1.111} = 0.9946$$

(2)  $I_{fK}^* = 0.9, I_{f0}^* = 1$ , 因此短路比

$$k_c = \frac{I_{f0}^*}{I_{fK}^*} = \frac{1}{0.9} = 1.11$$

(3)  $\varphi_N = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$

$$\psi_0 = \arctan \frac{I^* X_q^* + U^* \sin \varphi_N}{U^* \cos \varphi_N} = \arccos \frac{1 \times 0.6 + 1 \times 0.6}{1 \times 0.8} = 56.3^\circ$$

作出凸极发电机的相量图,如图 6-31 所示。

$$I_d^* = I^* \sin \psi_0 = 1 \times \sin 56.3^\circ = 0.832$$

$$I_q^* = I^* \cos \psi_0 = 1 \times \cos 56.3^\circ = 0.5548$$

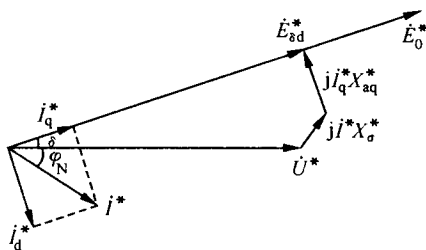


图 6-31 题 8 的发电机相量图

$$\delta = \psi_0 - \varphi_N = 56.3^\circ - 36.87^\circ = 19.43^\circ$$

$$\begin{aligned} E_{\text{sd}}^* &= U^* \cos \delta + I^* X_a^* \sin \psi = U^* \cos \delta + I_d^* X_a^* \\ &= 1 \times \cos 19.43^\circ + 0.832 \times 0.2 = 1.109 \end{aligned}$$

从空载特性曲线上由  $E_{\text{sd}}^*$  查得  $I_{\text{fd}}^* = 1.22$ , 则

$$I_{\text{fN}}^* = I_{\text{fd}}^* + I_{\text{fad}}^* = 1.22 + 0.8 = 2.02$$

(4) 由  $I_{\text{fN}}^*$  查空载特性曲线, 得  $E_0^* = 1.26$ , 则

$$\Delta u = \frac{E_0^* - U_N^*}{U_N^*} \times 100\% = \frac{1.26 - 1}{1} \times 100\% = 26\%$$

9. 答 并联运行时, 若电枢电流滞后于电压, 则发电机发出感性无功功率。减小励磁电流时, 不计电枢电阻, 发电机发出的有功功率不变。因此, 电枢电流  $\dot{I}$  变化的轨迹是垂直于  $\dot{U}$  的直线, 随着  $I_f$  的减小,  $\dot{I}$  由滞后于  $\dot{U}$  变为与  $\dot{U}$  同相; 若进一步减小  $I_f$ ,  $\dot{I}$  将超前  $\dot{U}$ 。 $\dot{I}$  的有效值在  $\dot{I}$  滞后于  $\dot{U}$  时随  $I_f$  减小而变小; 在  $\dot{I}$  超前于  $\dot{U}$  时, 则随  $I_f$  的减小而增大。

10. 答 (1) 发电机电压大于电网电压时, 发电机输出滞后无功电流; 发电机电压小于电网电压时, 发电机输出超前无功电流, 即输入滞后无功电流。

(2) 发电机频率大于电网频率时, 发电机输出有功电流; 发电机频率小于电网频率时, 发电机输入有功电流。

11. 解 (1) 每相励磁电动势  $E_0$  和功率角  $\delta$ 。

$$\varphi = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$$

$$I = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi} = \frac{3 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 11 \times 10^3 \times 0.8} \text{ A} = 196.82 \text{ A}$$

$$U = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3}} \text{ V} = 6350.85 \text{ V}$$

设  $\dot{U} = 6350.85 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则  $\dot{I} = 196.82 \angle -36.87^\circ \text{ A}$ , 故

$$\begin{aligned} \dot{E}_0 &= \dot{U} + j\dot{I}X_s = [6350.85 + j196.82(\angle -36.87^\circ) \times 12] \text{ V} \\ &= 7994.4 \angle 13.67^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

即  $E_0 = 7994.4 \text{ V}$ ,  $\delta = 13.67^\circ$ .

(2) 当  $\delta = 90^\circ$  时有最大电磁转矩

$$\begin{aligned} T_{\max} &= m \frac{E_0 U}{\Omega X_s} = 3 \frac{p}{2\pi f} \frac{E_0 U}{X_s} \\ &= 3 \times \frac{2}{2\pi \times 50} \times \frac{3 \times 7994.4 \times 6350.85}{12} \text{ N} \cdot \text{m} \\ &= 80804.7 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

12. 解 由汽轮发电机功角特性  $P_e = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \delta$ , 得

$$\begin{aligned} m \frac{E_0 U}{X_s} \sin 20^\circ &= m \frac{E'_0 60\% U}{X_s} \sin 25^\circ \\ \frac{E'_0}{E_0} &= \frac{\sin 20^\circ}{0.6 \times \sin 25^\circ} = \frac{0.342}{0.6 \times 0.423} = 1.35 \end{aligned}$$

13. 解 调节励磁电流, 电磁功率不变, 不计电枢电阻, 则输出有功功率不变,  $P_e = P_2 = S_N \cos \varphi = 31250 \times 0.8 \text{ kW} = 25000 \text{ kW}$ .

$$\begin{aligned} E_0 &= 1.1 E_{0N} = 1.1 \frac{P_e X_s}{3U \sin \delta_N} = 1.1 \frac{25000 \times 10^3 \times 7}{3 \times \frac{10500}{\sqrt{3}} \sin 35.93^\circ} \text{ V} \\ &= 18038.7 \text{ V} \end{aligned}$$

因  $P_e$  不变, 则  $E_0 \sin \delta = \text{常数}$ , 故

$$\begin{aligned} E_{0N} \sin \delta_N &= E_0 \sin \delta \\ \sin \delta &= \frac{E_{0N}}{E_0} \sin \delta_N = \frac{E_{0N}}{1.1 E_{0N}} \sin 35.93^\circ = 0.53345 \\ \delta &= 32.24^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} IX_s &= \sqrt{E_0^2 + U^2 - 2E_0 U \cos \delta} \\ &= \sqrt{18038.7^2 + 6062.2^2 - 2 \times 18038.7 \times 6062.2 \times \cos 32.24^\circ} \text{ V} \end{aligned}$$

$$= 13310.0 \text{ V}$$

故 
$$I = \frac{IX_s}{X_s} = \frac{13310.0}{7} \text{ A} = 1901.4 \text{ A}$$

$$\cos\varphi = \frac{P_2}{3UI} = \frac{25000 \times 10^3}{3 \times 6062.2 \times 1901.4} = 0.723$$

则 
$$\varphi = 43.7^\circ$$

$$Q = 3UI \sin\varphi = 3 \times 6062.2 \times 1901.4 \times \sin 43.7^\circ \text{ kvar} \\ = 23890.7 \text{ kvar}$$

无功功率增大了

$$Q - Q_N = (23890.7 - 18750) \text{ kvar} = 5140.7 \text{ kvar}$$

14. 解 (1) 设电网相电压  $\dot{U} = U \angle 0^\circ \text{ V}$ ,  $\varphi_c = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$ , 则  $\dot{I}_c = 50 \angle -36.87^\circ \text{ A}$ ;  $\varphi = \arccos 0.6 = 53.13^\circ$ , 则  $\dot{I} = 40 \angle -53.13^\circ \text{ A}$ 。

$$\dot{I}_L = \dot{I}_c + \dot{I} = (50 \angle -36.87^\circ + 40 \angle -53.13^\circ) \text{ A} \\ = 89.11 \angle -44.09^\circ \text{ A}$$

因此 
$$\cos\varphi_L = \cos 44.09^\circ = 0.72$$

(2) 当  $\cos\varphi = \cos\varphi_L$  时, 有功功率不变, 即  $I \cos\varphi = \text{常数}$ 。

$$I \cos\varphi = I' \cos\varphi_L$$

$$I' = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_L} I = \frac{0.6}{0.72} \times 40 \text{ A} = 33.33 \text{ A}$$

此时电网电流

$$I_c = I_L - I' = (89.11 - 33.33) \text{ A} = 55.78 \text{ A}$$

15. 解 (1) 由于原动机输入功率不变, 则电磁功率不变。电压降为  $0.8U_N$  后, 设功率角为  $\delta_1$ , 则

$$P_e = m \frac{E_0 U_N}{X_s} \sin\delta = m \frac{E_0 \times 0.8U_N}{X_s} \sin\delta_1$$

$$\sin\delta_1 = \frac{1}{0.8} \sin\delta = \frac{1}{0.8} \sin 30^\circ = 0.625$$

$$\delta_1 = 38.68^\circ$$

(2)  $E_0$  增大到原来的 1.6 倍, 电磁功率仍不变, 设功率角变为  $\delta_2$ , 则

$$P_e = m \frac{E_0 U_N}{X_s} \sin\delta = m \frac{1.6E_0 \times 0.8U_N}{X_s} \sin\delta_2$$

$$\sin\delta_2 = \frac{1}{1.28}\sin\delta = \frac{1}{1.28}\sin 30^\circ = 0.391$$

$$\delta_2 = 23^\circ$$

**16. 答** 当把补偿机装在电站内时,它是与电站的总负载相并联的,虽然总的功率因数提高了,但由于负载侧功率因数未变,因而输电线上除了要输送有功电流外,还要输送无功电流。因此,线路电流较大,线路损耗也较大。

当把补偿机装在离用户较近的变电站内时,负载侧的功率因数提高,电网的功率因数也提高了。这时输电线上的无功电流较小,在输送同样的有功功率时,线路总电流就较小,线路损耗也变小。如果能做到完全补偿,负载所需无功功率全部由补偿机供给,则输电线路只有有功电流,线路损耗降至最小。因此同步补偿机应装在变电站内。

**17. 答** 功率角  $\delta$  和电磁转矩  $T$  都先逐渐减小,减为零后,再随负载增加而反向逐渐增大。

随着  $\delta$  减小,电枢电流和功率因数的值也减小。当  $\delta$  减至零时,电枢电流达到最小值,  $\cos\varphi = 0$ 。之后,随着  $\delta$  反向增大,电枢电流和  $\cos\varphi$  的大小又都增大,但  $\cos\varphi$  符号与原来发电机时相反,即采用发电机惯例时,有  $\varphi > 90^\circ$ ,而无功功率的性质(感性或容性)未变。

**18. 解** (1) 三相短路电流

$$I_{K3}^* = \frac{E_0^*}{Z_+^*} = \frac{1}{1.55} = 0.645$$

(2) 两线之间短路时的短路电流

$$I_{K2}^* = \frac{\sqrt{3}E_0^*}{Z_+^* + Z_-^*} = \frac{\sqrt{3} \times 1}{1.55 \times 0.215} = 0.981$$

(3) 一线对中线短路时的短路电流

$$I_{K1}^* = \frac{3E_0^*}{Z_+^* + Z_-^* + Z_0^*} = \frac{3 \times 1}{1.55 + 0.215 + 0.054} = 1.649$$

可见三种故障情况下的稳态短路电流  $I_{K1}^* > I_{K2}^* > I_{K3}^*$ ,一相对中点短路情况的电流是最危险的。



## 第 7 章 机电能量转换原理

### 7.1 重点和难点

(1) 各种机电能量转换装置的用途和结构虽然各有差别,但其基本原理却是相同的。机电能量转换过程中的能量关系、能量转换过程是本章的重点。

(2) 机电装置中电磁转矩的计算,既是本章的重点,又是本章的难点。利用磁能或磁共能计算电磁转矩,是一种无需考虑电磁力分布和绕组内电流是否正弦波,直接求取电磁转矩总体值的通用方法。

(3) 机电能量转换的条件和产生恒定电磁转矩的条件是本章另一重点内容,它为分析各种特殊和新型电机提供理论基础。

### 7.2 习题详解

7-1 磁能和磁共能有什么关系?试导出线性双绕组系统的磁能公式  $W_m = \frac{1}{2}L_{11}i_1^2 + L_{12}i_1i_2 + \frac{1}{2}L_{22}i_2^2$  ( $i_1, i_2$  为绕组的电流,  $L_{11}, L_{22}$  为绕组的自感,  $L_{12}$  为互感)。

答 (1) 磁能

$$W_m(\psi, \theta) = \int_0^\psi i(\psi, \theta) d\psi$$

磁共能

$$W'_m(i, \theta) = \int_0^i \psi(i, \theta) di$$

从图 7-1 的  $\psi-i$  曲线可以看出

$$W_m(\psi, \theta) + W'_m(i, \theta) = \psi i$$

即磁能与磁共能之和可以用  $\psi i$  之积的矩形面积表示。当磁路为线性时,  $\psi-i$  曲线是一条直线,磁能和磁共能

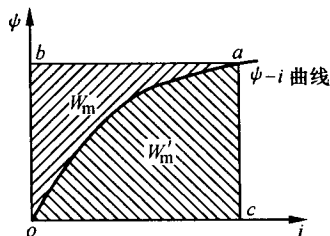


图 7-1 磁能与磁共能的关系

相等,即

$$W_m = W'_m = \frac{1}{2} \psi i$$

(2) 对于线性双绕组系统,取磁链  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  和转角  $\theta$  为自变量。在  $dt$  时间内,从电源输入的净电能

$$dW_e = -(e_1 i_1 + e_2 i_2) dt = i_1 d\psi_1 + i_2 d\psi_2$$

向机械系统输出的机械能

$$dW_{\text{mech}} = T_e d\theta_{\text{mech}} = \frac{1}{p} T_e d\theta$$

于是系统磁能的微分增量

$$dW_m(\psi_1, \psi_2, \theta) = dW_e - dW_{\text{mech}} = i_1 d\psi_1 + i_2 d\psi_2 - \frac{1}{p} T_e d\theta$$

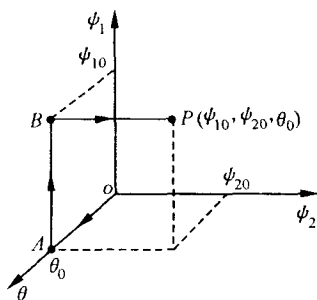


图 7-2 习题 7-1 双绕组系统  
磁能积分路径

对上式积分可求取系统的磁能。对于无损耗磁储能系统,磁能  $W_m$  取决于磁链和转角的终值  $\psi_{10}$ 、 $\psi_{20}$  和  $\theta_0$ ,而与达到终值的路径无关,故选择图 7-2 所示的最简单积分路径  $OABP$  求取  $W_m$ 。

在  $OA$  段,  $\psi_1 = \psi_2 = 0$ , 故电磁转矩  $T_e = 0$ , 由于  $d\psi_1 = d\psi_2 = 0$ , 所以此段内磁能  $W_m$  的三部分积分值都为 0。在  $AB$  段,  $d\theta = 0$ ,  $d\psi_2 = 0$ , 故磁能  $W_m$  的积分仅剩下第一部分, 即

$$\int_{AB} dW_m = \int_0^{\psi_{10}} i_1(\psi_1, 0, \theta_0) d\psi_1$$

在  $BP$  段,  $d\theta = 0$ ,  $d\psi_1 = 0$ , 磁能  $W_m$  的积分仅剩下第二部分, 即

$$\int_{BP} dW_m = \int_0^{\psi_{20}} i_2(\psi_{10}, \psi_2, \theta_0) d\psi_2$$

于是磁链和转角达到终值  $\psi_{10}$ 、 $\psi_{20}$  和  $\theta_0$  时, 磁能

$$W_m(\psi_{10}, \psi_{20}, \theta_0) = \int_0^{\psi_{10}} i_1(\psi_1, 0, \theta_0) d\psi_1 + \int_0^{\psi_{20}} i_2(\psi_{10}, \psi_2, \theta_0) d\psi_2$$

对于磁路为线性的情况, 磁链与电流之间为线性关系

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \\ \psi_2 &= L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \end{aligned} \right\}$$

由上式可解出对应的电流为

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{L_{22}}{D} \psi_1 - \frac{L_{12}}{D} \psi_2 \\ i_2 &= -\frac{L_{21}}{D} \psi_1 + \frac{L_{11}}{D} \psi_2 \end{aligned} \right\}$$

式中:  $D = L_{11}L_{12} - L_{12}^2$ 。

把电流  $i_1$  和  $i_2$  代入积分公式, 得磁能

$$\begin{aligned} W_m &= \int_0^{\psi_{10}} \left( \frac{L_{22}}{D} \psi_1 - \frac{L_{12}}{D} \psi_2 \right)_{\psi_2=0, \theta=\theta_0} d\psi_1 + \int_0^{\psi_{20}} \left( -\frac{L_{21}}{D} \psi_1 + \frac{L_{11}}{D} \psi_2 \right)_{\psi_1=\psi_{10}, \theta=\theta_0} d\psi_2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{L_{22}}{D} \psi_{10}^2 - \frac{L_{21}}{D} \psi_{10} \psi_{20} + \frac{1}{2} \frac{L_{11}}{D} \psi_{20}^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{L_{22}}{L_{11}L_{12} - L_{12}^2} (L_{11}i_1 + L_{12}i_2)^2 \\ &\quad - \frac{L_{12}}{L_{11}L_{12} - L_{12}^2} (L_{11}i_1 + L_{12}i_2)(L_{21}i_1 + L_{22}i_2) \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{L_{11}}{L_{11}L_{12} - L_{12}^2} (L_{21}i_1 + L_{22}i_2)^2 \\ &= \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + L_{12} i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 \quad (L_{12} = L_{21}) \end{aligned}$$

7-2 试导出以电流和转子转角为自变量时, 定、转子双边激励的双绕组机电装置的电磁转矩公式(系统为线性)。

解 对于定、转子双边激励的双绕组机电装置, 以电流  $i$  和转子转角  $\theta$  作为自变量。系统输出微分机械能

$$\begin{aligned} T_e d\theta_{\text{mech}} &= dW_e - dW_m \\ &= (i_1 d\psi_1 + i_2 d\psi_2) - d(i_1 \psi_1 + i_2 \psi_2 - W'_m) \\ &= -\psi_1 di_1 - \psi_2 di_2 + \left( \frac{\partial W'_m}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial W'_m}{\partial i_2} di_2 + \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} d\theta \right) \\ &= \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} d\theta \end{aligned}$$

于是电磁转矩

$$T_e = \frac{\partial W'_m(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta_{\text{mech}}} = p \frac{\partial W'_m(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta}$$

在线性情况下,把磁共能

$$W'_m = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + L_{12} i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2$$

代入电磁转矩表达式,得双绕组机电装置的电磁转矩公式

$$\begin{aligned} T_e &= p \frac{\partial W'_m(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta} \\ &= p \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + L_{12} i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 \right) \\ &= p \left( \frac{1}{2} i_1^2 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + i_1 i_2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \right) \end{aligned}$$

7-3 什么是转换功率?它与绕组内哪部分电动势吸收的功率有关?

答 转换功率是指机电能量转换装置单位时间内由磁能转换为机械能的这部分能量,即转换功率就等于输出的机械功率。

转换功率与绕组内运动电动势吸收的功率有关,它等于所有绕组中运动电动势所吸收的电功率的 1/2。

7-4 试述定、转子双边激励的机电装置中,进行连续机电能量转换的条件。对于隐极电机和单边凸极电机,为进行连续的机电能量转换,定、转子电流的频率约束有何不同?

答 (1) 定、转子双边激励的机电装置进行连续机电能量转换的条件如下。

① 定、转子的极数必须相等。

② 定、转子的自感和互感随转角的变化率  $\frac{\partial L_{11}}{\partial \theta}$ 、 $\frac{\partial L_{22}}{\partial \theta}$  和  $\frac{\partial L_{12}}{\partial \theta}$  不能都等于 0。否则,转角变化时耦合场对机械系统没有反应,于是电磁转矩等于零,从而无法实现机电能量转换。

③ 定、转子绕组内的电流必须是交流,或者有的是交流,有的是直流,而不能全部是直流。如果所有绕组内的电流都是直流,则转换功率的平均值就等于 0。

(2) 对于隐极电机,定、转子的电流角频率分别为  $\omega_1$  和  $\omega_2$ ,则频率

约束为

$$p\Omega = \pm (\omega_1 \pm \omega_2)$$

若  $\omega_1$  和  $\omega_2$  中有一个是可变的, 则电机可在不同转速下进行能量转换。

对于单边凸极电机, 频率约束为

$$p\Omega = \pm \omega_1$$

可见对单边凸极电机, 为使磁阻转矩和主电磁转矩均能发挥作用, 电机仅能在与  $\omega_1$  相应的同步转速下运行。

### 7-5 试述耦合磁场在机电能量转换过程中的作用。

答 在机电能量转换过程中, 作为耦合场的磁场既可以从电系统输入或输出能量, 也可以对机械系统输出或输入能量, 其状态主要取决于对磁链  $\psi$  和可动部分角位移  $\theta$  所加的约束。

(1) 若装置的可动部分静止不动,  $d\theta_{\text{mech}} = 0$ , 则  $dW_{\text{mech}} = 0$ , 于是  $dW_e = dW_m$ , 此时没有机械能输出, 通过磁链的变化从电系统输入的电能将全部转换为磁能。

(2) 若装置的磁链不变,  $d\psi = 0$ , 则  $dW_e = 0$ , 于是  $-dW_m = dW_{\text{mech}}$ , 此时装置无电能输入, 随着可动部分的转动, 磁能逐步释放出来变为输出的机械能。

(3) 一般情况下, 一方面磁链发生变化, 另一方面可动部分又有位移, 此时由位移引起的磁能变化将产生电磁力, 并使部分磁场储能释放出来变为机械能。由磁链变化引起的磁能变化, 将通过线圈内的感应电动势从电源输入等量的电能而不断地得到补充, 这样, 通过耦合场的作用, 电能将不断地转换为机械能或反之。

总之, 机电能量转换过程以耦合磁场为中心, 从电能转换为磁能, 再从磁能转换为机械能(或反之)。如果没有耦合场, 或者场的储能发生变化时不能对电系统和机械系统作出反应, 则机电能量间的转换就无法实现。

7-6 哪些项是“机电耦合项”? 它们在机电能量转换中起什么作用?

答 (1) 感应电动势和电磁转矩是耦合场与电系统和机械系统的“机电耦合项”。

(2) 在机电能量转换过程中,耦合场内磁场的变化,使外接电路内产生感应电动势,并使外接电源向耦合磁场输入电能。产生感应电动势是耦合场从电源输入电能的必要条件。另一方面,耦合场磁能发生变化时,作为对机械系统的反应,将同时产生电磁转矩,使磁能转化为机械能并向机械系统输出。因此,机电能量转换过程是耦合场通过感应电动势和电磁转矩这两个“机电耦合项”对电系统和机械系统之间相互作用的过程。

7-7 试导出图 7-3 所示双边激励机电装置的电磁转矩  $T_e$ 。已知:  $L_{11} = L_{22} = L_0 + L_2 \cos 2\theta$ ,  $L_{12} = L_{21} = M \cos \theta$ ,  $2p = 2$ , 电源电压  $u_1 = u_2 = U_m \sin \omega t$ , 绕组电阻忽略不计。

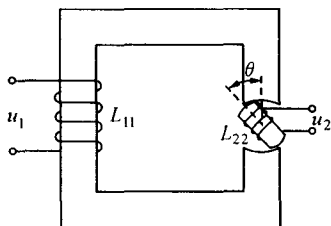


图 7-3 习题 7-7 的双边激励  
机电装置

解 由于  $u_1 = i_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt}$

$$u_2 = i_2 R_2 + \frac{d\psi_2}{dt}$$

而且  $u_1 = u_2 = U_m \sin \omega t$ , 绕组电阻忽略不计, 故有

$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = U_m \sin \omega t$$

$$u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} = U_m \sin \omega t$$

$$\psi_1 = \psi_2 = -\frac{U_m}{\omega} \cos \omega t$$

双边激励机电装置的磁能

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{1}{2} \frac{L_{22}}{D} \psi_1^2 - \frac{L_{12}}{D} \psi_1 \psi_2 + \frac{1}{2} \frac{L_{11}}{D} \psi_2^2 = \frac{1}{2} \frac{L_{11}}{D} \psi_1^2 - \frac{L_{12}}{D} \psi_1^2 + \frac{1}{2} \frac{L_{11}}{D} \psi_1^2 \\ &= \frac{L_{11} - L_{12}}{D} \psi_1^2 = \frac{L_{11} - L_{12}}{L_{11} L_{12} - L_{12}^2} \psi_1^2 = \frac{L_{11} - L_{12}}{L_{11}^2 - L_{12}^2} \psi_1^2 \\ &= \frac{1}{L_{11} + L_{12}} \psi_1^2 = \left( \frac{U_m}{\omega} \right)^2 \frac{\cos^2 \omega t}{L_0 + L_2 \cos 2\theta + M \cos \theta} \end{aligned}$$

电磁转矩

$$T_e = -p \frac{\partial W_m}{\partial \theta}$$

$$\begin{aligned}
 &= -1 \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \left( \frac{U_m}{\omega} \right)^2 \frac{\cos^2 \omega t}{L_0 + L_2 \cos 2\theta + M \cos \theta} \right] \\
 &= - \left( \frac{U_m}{\omega} \right)^2 \frac{2L_2 \sin 2\theta + M \sin \theta}{(L_0 + L_2 \cos 2\theta + M \cos \theta)^2} \cos^2 \omega t
 \end{aligned}$$

**7-8** 某一机电系统上装有两个绕组,其中绕组1装在定子上,绕组2装在转子上。设绕组的电感为  $L_{11} = 2 \text{ H}$ ,  $L_{22} = 1 \text{ H}$ ,  $L_{12} = 1.4 \cos \theta \text{ (H)}$ ,  $\theta$  为定、转子绕组轴线间的夹角;绕组的电阻忽略不计,  $2p = 2$ 。试求:

(1) 两个绕组串联,通入电流  $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$  时,作用在转子上的电磁转矩的瞬时值  $T_e$  和平均值  $T_{e(av)}$ ;

(2) 转子不动,绕组2短路,绕组1内通以电流  $i_1 = 14 \sin \omega t \text{ (A)}$  时,作用在转子上的电磁转矩。

**解** (1) 两个绕组串联,通入电流  $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$ ,  $p = 1$  时,瞬时电磁转矩

$$\begin{aligned}
 T_e &= \frac{1}{2} i_1^2 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} + i_1 i_2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} = i^2 \frac{\partial}{\partial \theta} (1.4 \cos \theta) \\
 &= -(\sqrt{2} I \sin \omega t)^2 (1.4 \sin \theta) \\
 &= -1.4 I^2 [\sin \theta - 0.5 \sin(\theta + 2\omega t) - 0.5 \sin(\theta - 2\omega t)]
 \end{aligned}$$

设转子的机械角速度为  $\Omega$ ,  $t = 0$  时,定、转子绕组轴线的夹角为  $\delta$ , 则  $\theta = \Omega t + \delta$ , 于是电磁转矩

$$\begin{aligned}
 T_e &= -1.4 I^2 [\sin(\Omega t + \delta) - 0.5 \sin(\Omega t + \delta + 2\omega t) \\
 &\quad - 0.5 \sin(\Omega t + \delta - 2\omega t)]
 \end{aligned}$$

可见,当  $\theta = \delta = \text{常值}$  时,电磁转矩平均值为

$$T_{e(av)} = -1.4 I^2 \sin \delta$$

当  $\theta = \pm 2\omega t + \delta$  时,电磁转矩平均值为

$$T_{e(av)} = 0.7 I^2 \sin \delta$$

当  $\theta$  等于其他值时,电磁转矩平均值为

$$T_{e(av)} = 0$$

(2) 由  $L_{11} = 2 \text{ H}$ ,  $L_{22} = 1 \text{ H}$  得

$$\frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} = \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} = 0$$

所以电磁转矩中仅有主电磁转矩,则

$$T_e = p i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta} = i_1 i_2 \frac{d}{d\theta} (1.4 \cos\theta) = -1.4 i_1 i_2 \sin\theta$$

由于

$$\psi_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2 = 1.4 \cos\theta i_1 + i_2$$

而

$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} = \frac{d\psi_2}{dt} = 0$$

故有

$$1.4 \cos\theta \frac{\partial i_1}{\partial t} + \frac{\partial i_2}{\partial t} = 0$$

$$1.4 \cos\theta \times (14 \cos\omega t) \omega + \frac{\partial i_2}{\partial t} = 0$$

求解,得

$$i_2 = -19.6 \cos\theta \sin\omega t$$

把  $i_2$  代入电磁转矩公式,得

$$\begin{aligned} T_e &= -1.4 i_1 i_2 \sin\theta \\ &= -1.4 \times 14 \sin\omega t \times (-19.6 \cos\theta \sin\omega t) \sin\theta \\ &= 384.16 \sin\theta \cos\theta \sin^2 \omega t \\ &= 192.08 \sin 2\theta \sin^2 \omega t \end{aligned}$$

7-9 有一双边激励的两绕组无损耗磁场式机电系统,  $2p = 2$ , 其电压方程为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= 2ai_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d}{dt} [b(\theta)i_2] \\ u_2 &= \frac{d}{dt} [b(\theta)i_1] + 2ci_2 \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \right\}$$

式中:  $a > 0, c > 0$ 。试求:

(1) 系统的磁能和磁共能;

(2) 用  $i_1, i_2$  和转角  $\theta$  表达时电磁转矩的表达式。

解 (1) 把两绕组的电压方程改写为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{d}{dt} (ai_1^2) + \frac{d}{dt} [b(\theta)i_2] = \frac{d\psi_1}{dt} \\ u_2 &= \frac{d}{dt} [b(\theta)i_1] + \frac{d}{dt} (ci_2^2) = \frac{d\psi_2}{dt} \end{aligned} \right\}$$

即可求出绕组 1 和 2 的  $\psi$ - $i$  关系为

$$\psi_1 = ai_1^2 + b(\theta)i_2$$



$$\psi_2 = b(\theta)i_1 + \alpha_2^2$$

计算磁共能时,先使  $i_1$  由 0 增加到终值,然后保持  $i_1$  不变,使  $i_2$  由 0 增加到终值。则

$$\begin{aligned} W'_m(i_1, i_2, \theta) &= \int_{i_1=0, i_2=0}^{i_1, 0} \psi_1 di_1 + \int_{i_1=i_1, i_2=0}^{i_1, i_2} \psi_2 di_2 \\ &= \int_0^{i_1} \alpha_1^2 di_1 + \int_{i_1, 0}^{i_1, i_2} [b(\theta)i_1 + \alpha_2^2] di_2 \\ &= \frac{1}{3}\alpha_1^3 + b(\theta)i_1 i_2 + \frac{1}{3}\alpha_2^3 \end{aligned}$$

磁能

$$\begin{aligned} W_m &= \psi_1 i_1 + \psi_2 i_2 - W'_m \\ &= [\alpha_1^2 + b(\theta)i_2]i_1 + [b(\theta)i_1 + \alpha_2^2]i_2 - \\ &\quad \left[ \frac{1}{3}\alpha_1^3 + b(\theta)i_1 i_2 + \frac{1}{3}\alpha_2^3 \right] \\ &= \frac{2}{3}\alpha_1^3 + b(\theta)i_1 i_2 + \frac{2}{3}\alpha_2^3 \end{aligned}$$

(2) 电磁转矩

$$\begin{aligned} T_e &= p \frac{\partial W'_m(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta} \\ &= 1 \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{1}{3}\alpha_1^3 + b(\theta)i_1 i_2 + \frac{1}{3}\alpha_2^3 \right] \\ &= i_1 i_2 \frac{db(\theta)}{d\theta} \end{aligned}$$

**7-10** 设隐极同步电机定子三相绕组的自感为  $L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = L_s$ ,  $L_{BC} = L_{CB} = M_s \cos \theta$ ,  $L_{CA} = L_{AC} = M_s \cos(\theta - 120^\circ)$ ,  $L_{AB} = L_{BA} = M_s \cos(\theta + 120^\circ)$ , 定子三相绕组与转子励磁绕组的互感分别为  $M_{Af} = M_f \cos \theta$ ,  $M_{Bf} = M_f \cos(\theta - 120^\circ)$ ,  $M_{Cf} = M_f \cos(\theta + 120^\circ)$ , 不计饱和。试导出定子电流为三相对称、励磁电流为  $I_f$  (直流)、转子为同步转速时,电磁转矩的表达式(电机为  $2p$  极)。

**解** 设三相定子电流为

$$\begin{aligned} i_A &= \sqrt{2}I \cos \omega t \\ i_B &= \sqrt{2}I \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_C &= \sqrt{2}I \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}$$

隐极同步电机的磁共能

$$W'_m = \frac{1}{2} L_{AA} i_A^2 + \frac{1}{2} L_{BB} i_B^2 + \frac{1}{2} L_{CC} i_C^2 + L_{AB} i_A i_B + L_{AC} i_A i_C + L_{BC} i_B i_C + L_{Af} i_A I_f + L_{Bf} i_B I_f + L_{Cf} i_C I_f$$

于是可得电磁转矩

$$\begin{aligned} T_e &= p \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} \\ &= p \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{1}{2} L_{AA} i_A^2 + \frac{1}{2} L_{BB} i_B^2 + \frac{1}{2} L_{CC} i_C^2 + L_{AB} i_A i_B + L_{AC} i_A i_C + L_{BC} i_B i_C + L_{Af} i_A I_f + L_{Bf} i_B I_f + L_{Cf} i_C I_f \right] \\ &= p \frac{\partial}{\partial \theta} (L_{AB} i_A i_B + L_{AC} i_A i_C + L_{BC} i_B i_C + L_{Af} i_A I_f + L_{Bf} i_B I_f + L_{Cf} i_C I_f) \\ &= -p M_s [i_A i_B \sin(\theta + 120^\circ) + i_A i_C \sin(\theta - 120^\circ) + i_B i_C \sin \theta] - p M_f I_f [i_A \sin \theta + i_B \sin(\theta - 120^\circ) + i_C \sin(\theta + 120^\circ)] \end{aligned}$$

### 7.3 经典题型

1. 如图 7-4 所示的磁路, 其尺寸为  $l_{Fe} = 120 \text{ mm}$ ,  $\delta = 1 \text{ mm}$ , 铁心内的磁通密度  $B = 1 \text{ T}$ , 此时铁心的磁导率  $\mu_{Fe} \approx 1200\mu_0$ 。试求气隙和铁心内储存的磁能之比 (不计气隙磁场的边缘效应)。

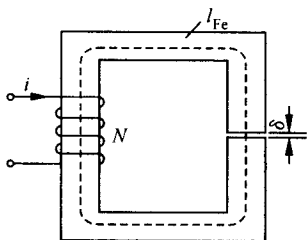


图 7-4 题 1 的铁心磁路

解 气隙和铁心中单位体积的磁能分别为

$$w_{m\delta} = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad w_{mFe} = \frac{B^2}{2\mu_{Fe}}$$

$$\text{故} \quad \frac{w_{m\delta}}{w_{mFe}} = \frac{\mu_{Fe}}{\mu_0} \approx 1200$$

整个铁心和整个气隙内的磁能

比为

$$\frac{W_{m\delta}}{W_{mFe}} = \frac{w_{m\delta} A \delta}{w_{mFe} A l_{Fe}} = \frac{w_{m\delta} \delta}{w_{mFe} l_{Fe}} \approx \frac{1200}{120} = 10$$

2. 有一固定线圈和可动线圈的线性双线圈机电系统,如图 7-5 所示,线圈电感为  $L_{11} = \text{常值}$ ,  $L_{22} = \text{常值}$ ,  $L_{21} = L_{12} = M \cos \theta$ 。试求下列三种情况下电磁转矩的瞬时值和平均值。

- (1)  $i_1 = i_2 = I_0$  (直流);
- (2)  $i_1 = I_m \sin \omega t$ ,  $i_2 = I_0$  (直流);
- (3)  $i_1 = i_2 = I_m \sin \omega t$ 。

解 因为系统是线性的,所以磁能和磁共能相等,即

$$W_m = W'_m = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 + L_{12} i_1 i_2$$

而瞬时电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} + i_1 i_2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} \\ &= i_1 i_2 \frac{d}{d\theta} (M \cos \theta) = -M i_1 i_2 \sin \theta \end{aligned}$$

设转子旋转的机械角速度为  $\Omega$ ,  $t = 0$  时转子的初相角为  $\delta$ , 则时间为  $t$  时刻转子的偏转角

$$\theta = \Omega t + \delta$$

则瞬时电磁转矩可以表示为

$$T_e = -M i_1 i_2 \sin(\Omega t + \delta)$$

- (1) 若  $i_1 = i_2 = I_0$  (直流), 则

$$T_e = -M I_0^2 \sin(\Omega t + \delta)$$

可见, 若  $\Omega \neq 0$ , 则一个周期内的平均电磁转矩为零; 若  $\Omega = 0$ , 则  $T_e = -M I_0^2 \sin \delta$ 。

- (2) 若  $i_1 = I_m \sin \omega t$ ,  $i_2 = I_0$  (直流), 则瞬时电磁转矩

$$\begin{aligned} T_e &= -M I_m I_0 \sin(\Omega t + \delta) \sin \omega t \\ &= \frac{1}{2} M I_m I_0 [\cos(\Omega t + \omega t + \delta) - \cos(\Omega t - \omega t + \delta)] \end{aligned}$$

很明显, 若  $\Omega \neq \pm \omega$ , 则平均电磁转矩为零; 若  $\Omega = \pm \omega$  (即转子为同步转速), 则

$$T_{e(av)} = \mp \frac{1}{2} M I_m I_0 \cos \delta$$

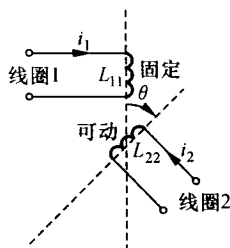


图 7-5 题 2 的双线圈机电系统示意图

(3) 若  $i_1 = i_2 = I_m \sin \omega t$ , 则

$$\begin{aligned} T_e &= -MI_m^2 \sin(\Omega t + \delta) \sin^2 \omega t \\ &= -\frac{1}{2}MI_m^2 [\sin(\Omega t + \delta) - \\ &\quad \frac{1}{2}\sin(\Omega t + 2\omega t + \delta) - \frac{1}{2}\sin(\Omega t - 2\omega t + \delta)] \end{aligned}$$

可见, 若  $\Omega \neq \pm 2\omega$ , 则  $T_{e(av)} = 0$ ; 若  $\Omega = \pm 2\omega$ , 则

$$T_{e(av)} = \frac{1}{4}MI_m^2 \sin \delta$$

3. 试述产生恒定电磁转矩的条件。

答 要产生恒定的电磁转矩, 就要求定、转子磁动势的幅值为常数, 它们之间的夹角亦为常数, 即定、转子磁动势波之间不能有相对运动, 而在空间保持相对静止。具体来说, 若定子磁动势为圆形旋转磁动势, 则转子磁动势应为同一推移速度的圆形旋转磁动势; 若定子磁动势为静止不动的恒定磁动势, 则转子磁动势亦应是静止不动的恒定磁动势。

## 7.4 补充习题及解答

### 7.4.1 补充习题

1. 机电装置的能量损耗通常分为哪几类? 如何构成“无损耗磁储能系统”?

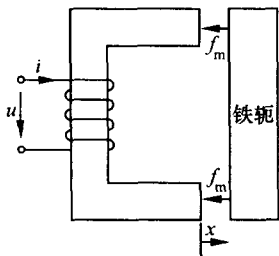


图 7-6 题 4 的机电系统

2. 利用磁能或磁共能求取电磁转矩时, 应注意两种计算方法有哪些不同?

3. 试导出线性双绕组系统的电压方程和功率方程。

4. 如图 7-6 所示机电系统, 其  $i-\psi$  关系为  $i = a\psi^2 + b\psi(x-c)^2$  ( $a, b, c$  均为常数), 试导出铁枢在位置  $x = g$  时受到的电磁力。

5. 图 7-7 所示为一隐极电动机, 定子上有一个绕组, 转子上有两个相互正交的绕组。已知各绕组自感  $L_a$ 、 $L_b$ 、 $L_c$  为常值, 绕组 a 与 b、a 与 c 的互感为  $M_{ab} = M\cos\theta$ ,  $M_{ac} = M\sin\theta$ , 绕组的电阻分别为  $R_a$ 、 $R_b$  和  $R_c$ , 绕组的电流为  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$ 。试求电动机的磁共能和电磁转矩。

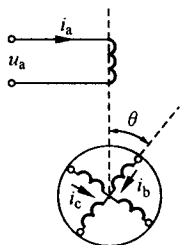


图 7-7 题 5 的隐极电动机示意图

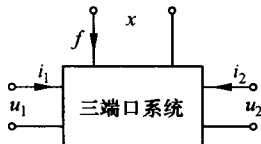


图 7-8 题 6 的双边激励机电系统

6. 图 7-8 所示为一个双边激励的机电系统, 已知两个电端口的伏安特性为

$$u_1 = 2ai_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d}{dt}[b(x)i_2]$$

$$u_2 = \frac{d}{dt}[b(x)i_1] + 2ci_2 \frac{di_2}{dt}$$

其中,  $a$  和  $c$  是正的常数,  $b(x)$  是  $x$  的单值函数, 且与电流无关。试求:

- (1) 系统的磁共能和磁能;
- (2) 用  $i_1$ 、 $i_2$  和  $x$  表达的电磁力。

#### 7.4.2 补充习题解答

1. 答 机电装置的能量损耗通常分为三类: 第一类是电系统内部的电阻损耗; 第二类是机械系统的摩擦损耗、通风损耗, 统称为机械损耗; 第三类是耦合电磁场在介质内产生的损耗, 包括磁滞和涡流损耗等。

将机电装置作为一个具有电端口和机械端口的两端口装置, 把电阻损耗和机械损耗移出, 分别用电阻  $R$  和旋转阻力系数  $R_n$  中的损耗来

表示,并不计铁磁介质中的介质损耗,则装置的中心部分将成为一个由无铁耗的铁心、气隙和无铜耗、无机械损耗的动态耦合线圈所组成的“无损耗磁储能系统”,如图 7-9 所示。

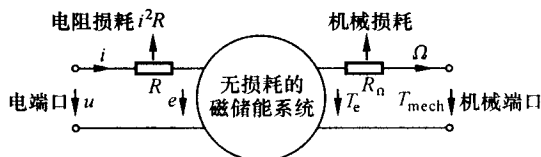


图 7-9 题 1 的“无损耗磁储能系统”

2. 答 利用磁能或磁共能求取电磁转矩,计算结果完全相同,但应该注意以下几点。

(1) 两种方法自变量的选取不同。磁能  $W_m$  以  $\psi, \theta$  作为自变量,磁共能  $W'_m$  则以  $i, \theta$  作为自变量。实际应用时,是以  $\psi, \theta$  还是以  $i, \theta$  作为自变量,取决于给定的原始数据怎样表达,最终的结果希望采用哪一组变量来表达,以及怎样表达能使结果更加简明、求导比较方便等因素。

(2) 两种方法转矩表达式右端的符号不同。用磁能  $W_m(\psi, \theta)$  对  $\theta$  求偏导数时,前面是负号;用磁共能  $W'_m(i, \theta)$  对  $\theta$  求偏导数时,前面是正号。

(3) 两个转矩表达式中  $W_m$  或  $W'_m$  对  $\theta$  求偏导数时,  $\psi$  或  $i$  约束为常值,这仅是自变量的选择所带来的数学制约,并不涉及实际端口处电的制约,因此不影响这两个公式的普遍性。

3. 解 设双绕组的电源电压分别为  $u_1$  和  $u_2$ , 电流为  $i_1$  和  $i_2$ , 磁链为  $\psi_1$  和  $\psi_2$ 。

在磁路为线性的情况下,  $\psi_1$  和  $\psi_2$  分别为

$$\begin{cases} \psi_1 = L_{11}(\theta)i_1 + L_{12}(\theta)i_2 \\ \psi_2 = L_{21}(\theta)i_1 + L_{22}(\theta)i_2 \end{cases}$$

双绕组内产生的感应电动势为

$$\begin{cases} e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -\left(L_{11}\frac{di_1}{dt} + L_{12}\frac{di_2}{dt}\right) - \left(i_1\frac{\partial L_{11}}{\partial\theta} + i_2\frac{\partial L_{12}}{\partial\theta}\right)\frac{d\theta}{dt} \\ e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -\left(L_{21}\frac{di_1}{dt} + L_{22}\frac{di_2}{dt}\right) - \left(i_1\frac{\partial L_{21}}{\partial\theta} + i_2\frac{\partial L_{22}}{\partial\theta}\right)\frac{d\theta}{dt} \end{cases}$$

若双绕组的电阻分别为  $R_1$  和  $R_2$ , 则双绕组的电压方程为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 - e_1 = i_1 R_1 + \left( L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \right) + \left( i_1 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + i_2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} \right) \omega_r \\ u_2 &= i_2 R_2 - e_2 = i_2 R_2 + \left( L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \right) + \left( i_1 \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} + i_2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \right) \omega_r \end{aligned} \right\}$$

用矩阵表示时, 电压方程变为

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \left( \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} \mathbf{i} \right) \omega_r = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} - \mathbf{e}_n$$

式中:  $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix},$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11}(\theta) & L_{12}(\theta) \\ L_{21}(\theta) & L_{22}(\theta) \end{bmatrix}, \mathbf{e}_n = \begin{bmatrix} i_1 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + i_2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} \\ i_1 \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} + i_2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \omega_r = - \left( \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} \mathbf{i} \right) \omega_r。$$

将双绕组电压方程

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 + \left( L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \right) + \left( i_1 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + i_2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} \right) \omega_r \\ u_2 &= i_2 R_2 + \left( L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \right) + \left( i_1 \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} + i_2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \right) \omega_r \end{aligned} \right\}$$

的第一式乘以  $i_1$ , 第二式乘以  $i_2$ , 然后相加, 可得双绕组系统的功率方程为

$$\begin{aligned} u_1 i_1 + u_2 i_2 &= (i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2) + \left( L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \right) i_1 + \\ &\quad \left( L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \right) i_2 + \left( i_1^2 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + i_1 i_2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} \right) \omega_r + \\ &\quad \left( i_1 i_2 \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} + i_2^2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \right) \omega_r \end{aligned}$$

用矩阵表示为

$$\mathbf{i}^T \mathbf{u} = \mathbf{i}^T \mathbf{R} \mathbf{i} + \mathbf{i}^T \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} - \mathbf{i}^T \mathbf{e}_n$$

式中:  $\mathbf{i}^T$  表示  $\mathbf{i}$  的转置矩阵。

4. 解 由  $i-\psi$  关系可知, 这是一个非线性系统, 自变量为磁链  $\psi$ , 系统磁能

$$\begin{aligned} W_m &= \int_0^\psi i d\psi = \int_0^\psi [a\psi^2 + b\psi(x-c)^2] d\psi \\ &= \frac{1}{3}a\psi^3 + \frac{1}{2}b\psi^2(x-c)^2 \end{aligned}$$

铁轭受到的电磁力

$$\begin{aligned} f_e &= -\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{3}a\psi^3 + \frac{1}{2}b\psi^2(x-c)^2 \right] \\ &= -b\psi^2(x-c) \end{aligned}$$

当  $x = g$  时, 有

$$f_{e(x=g)} = b\psi^2(c-g)$$

5. 解 (1) 电动机的磁共能

$$\begin{aligned} W'_m &= \frac{1}{2}L_a i_a^2 + \frac{1}{2}L_b i_b^2 + \frac{1}{2}L_c i_c^2 + M_{ab} i_a i_b + M_{ac} i_a i_c \\ &= \frac{1}{2}L_a i_a^2 + \frac{1}{2}L_b i_b^2 + \frac{1}{2}L_c i_c^2 + M \cos\theta i_a i_b + M \sin\theta i_a i_c \end{aligned}$$

(2) 电动机的电磁转矩

$$\begin{aligned} T_e &= p \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} \\ &= p \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{2}L_a i_a^2 + \frac{1}{2}L_b i_b^2 + \frac{1}{2}L_c i_c^2 + M \cos\theta i_a i_b + M \sin\theta i_a i_c \right) \\ &= p \frac{\partial}{\partial \theta} (M \cos\theta i_a i_b + M \sin\theta i_a i_c) = p M i_a (i_c \cos\theta - i_b \sin\theta) \end{aligned}$$

6. 解 (1) 把两个电端口的伏安方程改写为

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{d}{dt}(ai_1^2) + \frac{d}{dt}[b(x)i_2] = \frac{d\psi_1}{dt} \\ u_2 &= \frac{d}{dt}[b(x)i_1] + \frac{d}{dt}(ci_2^2) = \frac{d\psi_2}{dt} \end{aligned}$$

即可求出线圈 1 和 2 的  $\psi-i$  关系为

$$\psi_1 = ai_1^2 + b(x)i_2$$



$$\psi_2 = b(x)i_1 + ci_2^2$$

计算磁共能时,先使  $i_1$  由 0 增加到终值,再保持  $i_1$  不变,使  $i_2$  由 0 增加到终值。磁共能

$$\begin{aligned} W'_m &= \int_{i_1=0, i_2=0}^{i_1, 0} \psi_1 di_1 + \int_{i_1=i_1, i_2=0}^{i_1, i_2} \psi_2 di_2 \\ &= \int_0^{i_1} ai_1^2 di_1 + \int_{i_1, 0}^{i_1, i_2} [b(x)i_1 + ci_2^2] di_2 \\ &= \frac{1}{3} ai_1^3 + b(x)i_1 i_2 + \frac{1}{3} ci_2^3 \end{aligned}$$

磁能

$$\begin{aligned} W_m &= \psi_1 i_1 + \psi_2 i_2 - W'_m \\ &= [ai_1^2 + b(x)i_2]i_1 + [b(x)i_1 + ci_2^2]i_2 - \\ &\quad \left[ \frac{1}{3} ai_1^3 + b(x)i_1 i_2 + \frac{1}{3} ci_2^3 \right] \\ &= \frac{2}{3} ai_1^3 + b(x)i_1 i_2 + \frac{2}{3} ci_2^3 \end{aligned}$$

(2) 利用磁共能求电磁力表达式为

$$\begin{aligned} f_e &= \frac{\partial W'_m}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{3} ai_1^3 + b(x)i_1 i_2 + \frac{1}{3} ci_2^3 \right] \\ &= i_1 i_2 \frac{db(x)}{dx} \end{aligned}$$

## 参考文献

- [1] 汤蕴璆,史乃. 电机学[M]. 第2版. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [2] 许实章. 电机学[M]. 第2版. 北京:机械工业出版社,1996.
- [3] 冯欣南. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [4] 李哲生. 电机学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.
- [5] 李发海,朱东起. 电机学[M]. 第3版. 北京:科学出版社,2001.
- [6] 王正茂. 电机学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [7] 张广溢,郭前岗. 电机学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [8] 辜承林. 电机学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [9] 朱东起. 电机学[M]. 北京:中央广播电视大学出版社,1995.
- [10] 杨学勤. 电机学教学指导书[M]. 北京:中国电力出版社, 1997.
- [11] 龚世纛,熊永前. 电机学实例解析[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [12] 胡虔生. 电机学试题分析与习题[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [13] 李发海,王岩. 电机与拖动基础[M]. 第3版. 北京:清华大学出版社,2005.
- [14] 李发海. 电机与拖动基础学习指导书[M]. 北京:中央广播电视大学出版社,1987.
- [15] 孙旭东,冯大钧. 电机学习题与题解[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [16] 刘保安. 电机学——机电能量转换习题集[M]. 北京:机械工业出版社,1983.
- [17] 天津大学电力及自动化工程系. 研究生入学考试电机学试题精选详解(下)[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1986.

[General Information]

书名=新编电机学题解

作者=孙克军主编 朱维璐 王素芝副主编

页数=358

SS号=11886459

DX号=

出版日期=2007年09月第1版

出版社=华中科技大学出版社

封面

书名

版权

前言

目录

## 第1章 磁路

1.1 重点和难点

1.2 习题详解

1.3 经典题型

1.4 补充习题及解答

## 第2章 变压器

2.1 重点和难点

2.2 习题详解

2.3 经典题型

2.4 补充习题及解答

## 第3章 直流电机

3.1 重点和难点

3.2 习题详解

3.3 经典题型

3.4 补充习题及解答

## 第4章 交流绕组及其电动势和磁动势

4.1 重点和难点

4.2 习题详解

4.3 经典题型

4.4 补充习题及解答

## 第5章 感应电机

5.1 重点和难点

5.2 习题详解

5.3 经典题型

5.4 补充习题及解答

## 第6章 同步电机

6.1 重点和难点

6.2 习题详解

6.3 经典题型

6.4 补充习题及解答

## 第7章 机电能量转换原理

7.1 重点和难点

7.2 习题详解

7.3 经典题型

7.4 补充习题及解答

参考文献